



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

SMÁČIVOST POVRCHOVÝCH ÚPRAV DPS

WETTABILITY OF PCB SURFACE FINISHES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Minář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Jan Minář

ID: 164341

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Smáčivost povrchových úprav DPS

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku povrchových úprav desek plošných spojů a podrobněji se soustředte na imerzní cín a na chemický nikl s imerzním zlatem.

Odzkoušejte selektivní stripovací roztok/y na Sn, příp. i na Au. Z hmotnostních úbytků vypočtete tloušťku odstraněné vrstvy a porovnejte s tloušťkou stanovenou jinými metodami.

Metodou smáčecích vah proměřte smáčecí charakteristiky vybraných povrchových úprav Cu plátovaného základního materiálu FR-4 po výrobě, po izotermálním stárnutí, po průchodech přetavovací pecí i po selektivním stripování.

Vyhodnoťte dosažené výsledky – úroveň smáčení, odsmačení, vliv izotermálního stárnutí i vliv průchodů přetavovací pecí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 2.6.2016

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT:

Tato bakalářská práce se zabývá měřením smáčecích charakteristik pomocí metody smáčecích vah u vzorků různých povrchových úprav od firmy Gatema. Věnuje se vlivu izotermálního stárnutí a přetavovacích procesů na smáčecí charakteristiky povrchových úprav ENIG, bezolovnatý HAL a imerzní cín. U povrchové úpravy imerzním cínem je sledován vliv intermetalické vrstvy na celkovou smáčivost. Dále se zabývá smáčivostí vrstvy niklu, po odstripování zlata, u povrchové úpravy ENIG.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Povrchové úpravy, smáčivost, imerzní cín, HAL, ENIG, intermetalické sloučeniny, metoda smáčecích vah, smáčecí charakteristiky, stárnutí, stripování cínu, stripování zlata.

ABSTRACT:

This bachelor's thesis with measuring of wetting characteristics by the wetting balance method for samples of different surface finishes from the firm Gatema. It deals with influence of the isothermal aging and reflow processes on wetting characteristics of surface finishes ENIG, HAL and immersion tin. The influence of intermetallic layer on the overall wettability is studied in case of the surface finish of immersion tin. Also deals with the wettability of the nickel layer, after stripped off gold, in case of the surface finish of ENIG.

KEYWORDS:

Surface finishes, wettability, immersion tin, HAL, ENIG, intermetallic compounds, wetting balance method, wetting characteristics, aging, stripping of tin, stripping of gold.

MINÁŘ, J. *Smáčivost povrchových úprav DPS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Starý, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Smáčivost povrchových úprav DPS jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne:

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne:

.....
podpis autora

Obsah

ÚVOD	8
1 POVRCHOVÉ ÚPRAVY	9
1.1 HAL (Hot Air Leveling)	9
1.2 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)	10
1.3 Imerzní cín (Immersion Tin)	10
2 PÁJECÍ SLITINY	12
2.1 Sn63Pb37	13
2.2 SAC305	13
2.3 SN100C	13
3 TAVIDLA	14
3.1 VOC tavidla	14
3.2 VOC-free tavidla	14
4 PÁJITELNOST	15
5 STÁRNUTÍ MATERIÁLU	17
5.1 Oxidace povrchu	17
5.2 Intermetalické sloučeniny	17
6 METODIKA MĚŘENÍ	19
6.1 Metoda smáčecích vah	19
6.2 Smáčecí charakteristiky	20
6.3 Stripování cínu	22
6.3.1 Stripovací roztok TinSolv™ 1000	22
6.3.2 Stripovací roztok Solderstrip™ TS Omega	22
6.4 Stripování zlata	22
7 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	23
7.1 Měřené vzorky	23
7.2 Izotermální stárnutí vzorků	24
7.3 Průchod vzorků přetavovací pecí	25
7.4 Stripování cínu	26
7.5 Stripování zlata	27
7.6 Měření smáčecích charakteristik	28

7.7	Naměřené a vypočítané hodnoty	35
8	DISKUSE VÝSLEDKŮ	42
	ZÁVĚR.....	46
	LITERATURA.....	48
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	49
	SEZNAM OBRÁZKŮ	50
	SEZNAM TABULEK.....	51

ÚVOD

Tato bakalářská práce se věnuje povrchovým úpravám, především měření jejich smáčivosti. Teoretická část práce pojednává o různých typech povrchových úprav a výhodách využití jednotlivých druhů. Dále se zabývá pájitelností, vlivem stárnutí materiálů na smáčivost a jejím měřením, při využití metody smáčecích vah, která je zde popsána.

Praktická část práce se zabývá měřením smáčecích charakteristik. Smáčivost je měřena pomocí metody smáčecích vah. Měří se vzorky povrchových úprav bezolovnatý HAL, ENIG a imerzní cín, které byly dodány firmou Gatema. U těchto metod, se měří smáčecí charakteristiky po vystavení izotermálnímu stárnutí a po průchodech přetavovací pecí. Pozornost je zaměřena především na povrchovou úpravu imerzním cínem a technologii ENIG. U úpravy imerzním cínem jsou měřeny smáčecí charakteristiky po odstripování vrstvy cínu, přičemž zůstává jen vrstva intermetalických sloučenin, a je měřen úbytek hmotnosti během stripování. U povrchové úpravy ENIG je navíc měřena smáčivost po odstripování vrstvy zlata.

Tato práce vyhodnocuje vliv izotermálního stárnutí a přetavovacích procesů na smáčecí charakteristiky různých povrchových úprav a vliv intermetalické vrstvy na smáčivost u povrchové úpravy imerzním cínem. Dále se zabývá smáčivostí vrstvy niklu po odstripování zlata u povrchové úpravy ENIG.

1 POVRCHOVÉ ÚPRAVY

Vzhledem k tomu, že pájecí plošky jsou na deskách plošných spojů tvořeny mědí, která velmi rychle oxiduje, je potřeba je chránit před oxidací pomocí povrchových úprav. Vlivem zoxidovaného povrchu by totiž mohlo dojít ke špatnému smáčení, až nesmáčení povrchu, příp. i odsmačení pájky během pájecího procesu. Povrchové úpravy slouží především jako ochrana povrchu desky před oxidací, díky čemuž dojde ke zvýšení doby skladovatelnosti DPS, a tedy je zajištěna dobrá smáčivost i po delší době.

Vzhledem k tomu že neexistuje jeden universální druh povrchové úpravy, musí výrobce zvážit všechny výhody a nevýhody každé povrchové úpravy a vybrat nejlepší možnost pro konkrétní typ výrobku. Druh povrchové úpravy se vybírá především podle požadavků na následnou povrchovou montáž, nákladů na výrobu, ekologických aspektů (především použití bezolovnaté pájky), tloušťky nanášené vrstvy, rovinnosti povrchu vzniklého povrchu, možnosti kontaktování, vhodnosti pro fine pitch aplikace, eliminace teplotního šoku DPS a doby skladovatelnosti. [5]

1.1 HAL (Hot Air Leveling)

Dříve byl HAL nejpoužívanější povrchovou úpravou, především s použitím olovnaté pájky. Po zákazu používání olovnatých pájek se začalo přecházet na jiné povrchové úpravy. Jedná se o metodu nanášení roztavené pájky na měděný podklad. Deska se ponoří do roztavené pájky a po vytažení se její přebytek odfoukne pomocí horkého vzduchu. Používá se HAL s olovnatou i bezolovnatou pájkou (vzhledem k ekologickým opatřením se dnes používá především bezolovnatý HAL). Vzhled této povrchové úpravy se vyznačuje lesklým povrchem barvy cínu.

U technologie HAL s olovnatou pájkou, při následném bezolovnatém pájení může nastat jev tzv. fillet lifting, při němž dojde ke zvednutí okraje pájeného spoje.

Nevýhodou této technologie je především nedostatečná rovinnost vzniklého povrchu pro některé aplikace (tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí od 1 μm do 20 μm), a teplotní stres, způsobený ponořením desky do roztavené pájky, který může způsobit ohnutí desky, tato metoda tedy není vhodná při výrobě tenkých desek (přibližně do 0,4 mm). Tato metoda je také poměrně energeticky náročná, kvůli nutnosti roztavení velkého množství pájky k ponoření desky, a to především u HALu s bezolovnatou pájkou, kde je nutné pájku ohřát až na teplotu o 20 % vyšší. U technologie HAL s olovnatou pájkou jsou špatné ekologické aspekty, olovnatá pájka je ovšem na druhou stranu stabilnější než vrstva cínu. Další nevýhodou je nemožnost kontaktování vodičů, a nevhodnost pro aplikace s velmi malou roztečí, u kterých může po ponoření do pájky dojít ke vzniku zkratů. Výhodou je možnost vícenásobného teplotního cyklu, zajištění velmi dobré pájitelnosti a také dobrá doba skladovatelnosti takto upravených desek (asi 12 měsíců). Tato metoda je také méně nákladná než technologie ENIG.

1.2 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)

Jedná se o velmi kvalitní povrchovou úpravu. Zlato je pro povrchové úpravy ideální prvek z toho důvodu, že netvoří oxidy, desky s touto povrchovou úpravou mají dlouhou dobu skladovatelnosti (až 12 měsíců). Protože se zlato velmi rychle rozpouští do mědi, přidává se mezi vrstvy zlata a mědi ještě vrstva niklu. Samotný nikl ovšem velmi rychle oxiduje, takže by nebyl dostatečnou ochranou, zlato zde tedy plní především ochrannou funkci. Chemicky se zde nanáší vrstva niklu (3-5 μm) a poté vrstva zlata (0,05-0,2 μm). Při nanášení větší vrstvy zlata může dojít ke zhoršení smáčecích charakteristik. Do nanášené vrstvy niklu se také přidávají příměsi fosforu, který zvyšuje odolnost proti korozi, větší procento příměsí fosforu ovšem může způsobit zhoršení pájitelnosti spoje. Tato metoda se využívá především u náročnějších aplikací.

Výhodou u této metody je již zmiňovaná dlouhá doba skladovatelnosti, velmi dobrá rovinnost povrchu, následná možnost kontaktování, a vhodnost pro fine pitch aplikace. Oproti technologii HAL je zde také eliminován teplotní šok DPS a jsou zde lepší ekologické aspekty. Dalším důvodem použití této metody je teplotní stálost a možnost vícenásobného pájení přetavením, které u většiny ostatních povrchových úprav není možné. Nevýhodou je vyšší cena výroby (z důvodu použití drahého kovu jako je zlato). Dále difúze zlata do vznikajícího spoje a vytváření intermetalických sloučenin AuSn_4 a AuSn_2 , což způsobuje větší křehkost a menší pevnost spoje. U této metody je také obtížnější řízení procesu. Další problém vyskytující se u této povrchové úpravy je tzv. black pad, tedy černá pájecí ploška, kdy dojde k oddělení pájeného spoje od vrstvy niklu, protože intermetalické sloučeniny na rozhraní vrstev nikl-cín jsou křehčí než u rozhraní cín-měď, tomuto jevu je možné zabránit nanášením vrstvy niklu s příměsí fosforu. [14]

1.3 Imerzní cín (Immersion Tin)

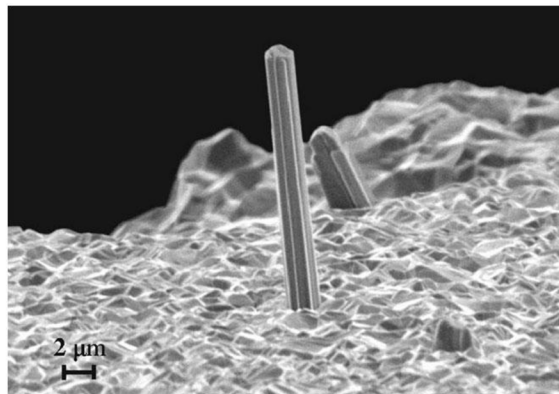
Jedná se o pocínování desky ponorem. Na povrch DPS se chemicky nanáší vrstva cínu tak, že se deska ponoří do kyselé bezproudé cínovací lázně. Existuje více druhů této povrchové úpravy. Například německá firma Ormecon přidává mezi vrstvu cínu a mědi vrstvu organického kovu o tloušťce asi 0,08 μm , která zabraňuje difúzi mezi mědí a cínem, a tedy zabraňuje vzniku intermetalické vrstvy [11]. Další druh této úpravy nabízí firma Atotech, která přidáním anti-whiskerových aditiv snižuje růst cínových whiskerů [12]. Touto technologií vzniká vrstva cínu s velmi dobrou rovinností, o tloušťce kolem 1 μm , která chrání měď před oxidací. Tato povrchová úprava má kratší možnou dobu skladovatelnosti, která se pohybuje kolem 3-6 měsíců. Vzhled této úpravy se vyznačuje lesklým nebo matným modrošedým povrchem.

Výhodou této metody je kromě rovinnosti také velmi dobrá materiálová kompatibilita s cínovou pájkou, dobré ekologické aspekty, malá technologická náročnost, nízké náklady na výrobu, výborná rovinnost povrchu a eliminace teplotního šoku. Nevýhodou této metody je

citlivost pájky na pot a nečistoty, které mohou zhoršovat smáčivost spoje. Je tedy po celou dobu nutná opatrná manipulace v ochranných rukavicích.

V závislosti na teplotě se s časem vytváří na přechodu měď – cín intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn . Pokud vznikne příliš tlustá vrstva těchto sloučenin, může dojít ke zhoršení pájitelnosti takto upravených pájecích plošek, zvyšuje se křehkost pájeného spoje, zmenšuje se jeho pevnost a zhoršují se jeho elektrické vlastnosti. Tyto vrstvy vznikají difúzí částic mědi do cínu a naopak.

Problémem může být také růst cínových whiskerů, což jsou tenká vlákna rostoucí na povrchu cínu a slitin cínu s malým množstvím příměsí. Tato vlákna, o délce většinou menší než 1 mm, rostou velmi pomalu, ale nakonec mohou způsobit zkrat, a tedy poruchu zařízení. Mechanismus růstu whiskerů není stále úplně jasný a je předmětem výzkumu [5]. Příklad cínového whiskeru můžeme vidět na obrázku 1.1.



Obr 1.1 Cínové whiskery [7]

2 PÁJECÍ SLITINY

Pájecí slitina je základní součást pájeného spoje. Při výběru pájecí slitiny se pozornost věnuje jejím mechanickým a elektrickým vlastnostem, materiálové kompatibilitě s použitými materiály, způsobu pájení, toxicitě (především obsahu olova v pájce) a ceně pájecí slitiny. Základním kritériem pro vznik kvalitního pájeného spoje je vznik difúzní vrstvy na rozhraní cínu a mědi, kde vznikají intermetalické sloučeniny.

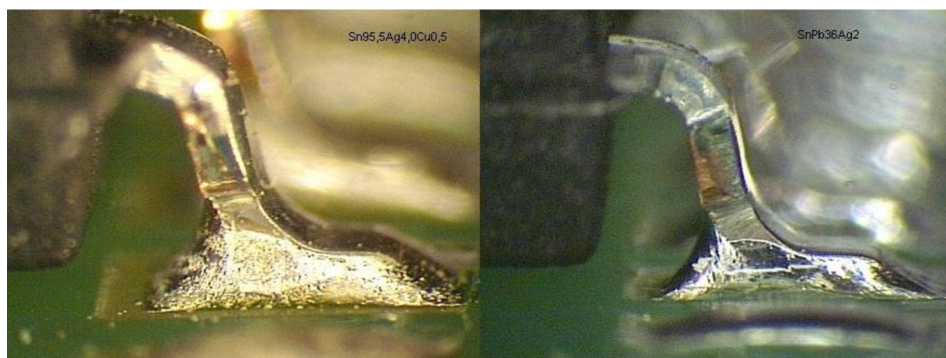
Pájka musí především zajišťovat [5]:

- Mechanickou fixaci součástky
- Elektrické propojení
- Odvod ztrátového tepla
- Ochranu před oxidací

Dříve se používaly pájky složené především z cínu a olova. Od 1. 7. 2006 je v zemích EU zákaz používání pájek s obsahem olova, proto se dnes ve většině aplikací až na výjimky používají pájky bez obsahu olova.

Bezolovnaté pájky mají sice lepší ekologické aspekty, ale jejich mechanické a elektrické vlastnosti nedosahují kvality olovnatých pájek. Tyto pájky jsou především křehčí a mají vyšší teplotu tavení. Zatímco eutektická olovnatá pájka SnPb má teplotu tání 183 °C, tak teploty tavení většiny bezolovnatých pájek se pohybují v rozmezí od 195 °C do 227 °C. Je tedy potřeba více energie k roztavení těchto slitin. Vyšší teplota pájení ovšem může mít negativní účinky na výsledný pájený spoj a ohled se také musí brát na teplotní odolnost pájených součástek. Dále vykazují bezolovnaté pájky horší smáčecí charakteristiky. Bezolovnaté pájky jsou taktéž ve většině případů dražší, protože bez olova se musí její vlastnosti vylepšovat jinými prvky, jako jsou stříbro, nikl, měď, bismut, antimon a další. Tyto prvky sice zlepšují vlastnosti pájky, ale zároveň mohou zvýšit její cenu nebo teplotu tavení. Většinu pájky ovšem stále tvoří cín.

Nejpoužívanějšími bezolovnatými pájecími slitinami dnes jsou SAC305 a SN100C. Rozdíl ve vzhledu mezi olovnatou a bezolovnatou pájkou můžeme vidět na obrázku 2.1.



Obr 2.1 Srovnání spoje s pájkou SAC305 a SnPb36Ag2 [5]

2.1 Sn63Pb37

Jde o nejpoužívanější olovnatou pájku. Tato pájka se skládá z 63 % cínu a 37 % olova. Teplota tání této pájecí slitiny je 183 °C, nízká teplota tavení je jednou z hlavních výhod této pájky. Mezi další výhody této pájky patří velmi dobrá tekutost. Výsledný spoj je hladký a lesklý, navíc tato pájka vykazuje velmi dobré smáčecí charakteristiky. Další výhodou této pájky je její nízká cena.

2.2 SAC305

SAC305 je v současnosti nejpoužívanější bezolovnatá pájka. Jde o pájku složenou z 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi, kde měď a stříbro především zvyšují pevnost spoje. Tato pájka se vlastnostmi asi nejvíce blíží olovnaté pájce Sn63Pb37. Dosahuje velmi dobrých mechanických vlastností a spolehlivosti pájeného spoje. Také má přijatelnou teplotu tavení, konkrétně 217 °C, tedy o 34 °C vyšší než olovnatá pájka. Pájka SAC vykazuje mírně horší smáčecí charakteristiky především vlivem většího povrchového napětí. Na rozdíl od olovnaté pájky má spoj s pájkou SAC matnější a drsnější povrch. Nevýhodou je vyšší cena, způsobená přítomností stříbra v pájce.

2.3 SN100C

Jedná se o druhou nejpoužívanější bezolovnatou pájku. Pájka je složena z 0,7 % mědi, 0,05 % niklu a 0,005 % germánia, zbytek pájky tvoří cín. Výhodou této pájky je její vyšší tekutost, která je srovnatelná s olovnatou pájkou Sn63Pb37, olovnaté pájce se podobá i svým vzhledem. Oproti pájce SAC305 je výhodou, vzhledem k absenci stříbra, nižší cena, tato pájka také vykazuje lepší smáčecí charakteristiky. Naopak nevýhodou je vyšší teplota tavení, která je 227 °C, tedy o 44 °C vyšší, než u olovnaté pájky. Oproti pájce SAC305 vykazuje SN100C lepší smáčecí charakteristiky i nižší erozi mědi a nerezi.

3 TAVIDLA

Tavidla se využívají pro zlepšení smáčecího procesu při pájení, a tedy přispívají k vytvoření kvalitního pájeného spoje. Mají tři základní funkce, a to chemickou, fyzikální a tepelnou. Chemická funkce tavidla je odstranění nečistot z pájeného spoje a odstranění oxidů na povrchu. Dále také brání materiálu v reoxidaci. Fyzikální funkcí tavidla je odstranění reakčních produktů ze spoje, tavidlo také snižuje povrchové napětí pájky a naopak zvyšuje povrchové napětí povrchu, díky čemuž se pájka může lépe roztéct po povrchu materiálu. Tepelná funkce tavidla zajišťuje dobrý přenos tepla od zdroje do celého pájeného spoje.

Tavidlo se skládá ze čtyř základních složek:

- tavidlového nosiče
- aktivátoru
- aditiva
- rozpouštědla

Tavidla dělíme na pryskyřicové, organické a anorganické, dále podle základní složky, aktivátoru a formy tavidla. Tavidla se vyrábí ve formě kapalné, tuhé nebo ve formě pasty.

Výběr tavidla je určen především jeho ekologickými aspekty, kompatibilitou s použitými materiály, cenou, způsobem nanášení, technologií pájení a odstranitelností tavidlových zbytků.

3.1 VOC tavidla

VOC tavidla jsou tavidla na alkoholové bázi. Tavidla s rozpouštědly na bázi alkoholu mohou obsahovat organické těkavé látky (Volatile Organic Compounds - VOC). Tyto látky se při procesu pájení uvolňují do atmosféry a poškozují ozonovou vrstvu, takže tavidla s obsahem těchto látek nejsou vhodná pro jejich špatné ekologické aspekty. Doporučují se tedy tzv. VOC-free tavidla které tyto látky neobsahují.

3.2 VOC-free tavidla

VOC-free tavidla jsou založena na vodní bázi. Tato tavidla neobsahují těkavé látky a jsou tedy z ekologického hlediska vhodnější. Kromě nižšího znečišťování ovzduší je další výhodou nehořlavost těchto tavidel, na rozdíl od tavidel obsahujících alkohol. Nevýhodou je větší povrchové napětí tavidla a také složitější proces nanášení.

➤ Tavidlo Kester 979T

Jedná se o tavidlo na bázi organické kyseliny bez obsahu halidů. Jde o bezoplachové, VOC-free tavidlo pro vysokou kvalitu pájení. Snižuje tvorbu kuliček na desce a zanechává jen minimum tavidlových zbytků. Tyto zbytky jsou nevodivé a nekorozivní, a nemusí být odstraněny [6].

4 PÁJITELNOST

Pájení je důležitá součást výroby plošných spojů. Jde o tepelné spojení kovů pomocí roztavené pájky. Pro kvalitní pájený spoj musí pájené materiály vykazovat dobrou pájitelnost, což je vlastnost určující vhodnost materiálu k pájení. Pájitelnost je různá pro každý druh kovu, jelikož každý kov má jinou schopnost vytvářet intermetalické sloučeniny, což je základní podmínkou pro vznik kvalitního spoje.

Pájitelnost materiálu, se může měnit v závislosti na stárnutí materiálu, úrovni koroze a může být ovlivněna i špatným skladováním. Také se zhoršuje s úrovní oxidace daného kovu. Zavádí se tedy pájení v ochranné inertní atmosféře tvořené dusíkem pro zabránění oxidaci.

Pájitelnost se hodnotí z hlediska tří aspektů [5]:

- Smáčivost
- Umožnění ohřevu plochy na požadovanou teplotu
- Odolnost vůči teplu při pájení

Smáčivost je jedním z hledisek pájitelnosti a je to základní požadavek pro vytvoření kvalitního spoje. Dobrá smáčivost povrchu zajistí dobré roztečení pájky po celé ploše pájecí plošky.

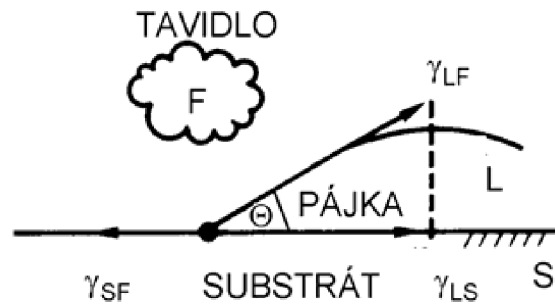
Pájka se po roztavení chová jako kapalina. Na její povrch tedy působí povrchové napětí, které se snaží, aby povrch kapaliny měl co nejmenší plochu, čímž dosahuje kulovitého tvaru. Dále na pájku působí adhezivní síly, které ji nutí rozšířit styčnou plochu mezi oběma kovy. Pokud je povrchové napětí pájky větší než adhezivní síly, dochází k tvorbě kuliček pájky na desce. Pokud jsou adhezivní síly větší než povrchové napětí, dochází ke smáčení povrchu. Pájka se roztéká po povrchu, dokud nejsou tyto síly v rovnováze.

Smáčivost je dána tzv. smáčecím úhlem θ . Podle velikosti smáčecího úhlu určujeme úroveň smáčení. Ideální stav nastává, pokud je smáčecí úhel roven nule, mluvíme o ideálním smáčení. Pokud je smáčecí úhel v rozmezí 20° - 90° , mluvíme o smáčení, a pokud je úhel větší než 90° , jde o nesmáčení.[13]

Platí podmínka rovnováhy na rozhraní tří fází, viz. obrázek 4.1, kterou popisuje Youngova rovnice:

$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} + \gamma_{LF} \cdot \cos\theta, \quad (4.1)$$

Kde γ_{SF} je povrchové napětí na rozhraní substrát-tavidlo, γ_{LS} je povrchové napětí na rozhraní pájka-substrát, γ_{LF} je povrchové napětí na rozhraní pájka-tavidlo a θ je smáčecí úhel. Povrchové napětí se udává v jednotkách Nm^{-1} a smáčecí úhel ve stupních.



Obr 4.1 Smáčení povrchu pájkou [2]

Z rovnice je patrné, že povrchové napětí na rozhraní je základní kritérium pro dobrou smáčivost povrchu. V praxi se snažíme docílit co nejmenšího povrchového napětí na rozhraní tavidlo-pájka a pájka-substrát a co největšího povrchového napětí na rozhraní tavidlo-substrát, tím se zmenší smáčecí úhel, a tedy zlepši smáčivost. V rovnici není zahrnut vliv gravitační síly a reakce mezi pájkou a substrátem.

Smáčivost dále závisí na druhu použité pájky, jejích vlastnostech, na naneseném tavidle, na povrchové úpravě desky a vývodů součástky a na pájecí atmosféře. Dále musí mít pájka odpovídající pracovní teplotu, aby došlo k jejímu správnému roztečení po desce. Důležitým faktorem je také obsah nečistot v pájeném spoji, míra oxidace povrchu a jeho drsnost. Pro lepší smáčivost se používá zvýšení teploty pájení, zvětšení aktivity tavidla nebo pájení v ochranné atmosféře. Přičemž teplota pájení je omezena použitým materiálem, případně tepelnou odolností součástek. Navíc při vyšší teplotě dochází k větší míře oxidace.

5 STÁRNUTÍ MATERIÁLU

Stárnutí materiálu je způsobeno především oxidací povrchu a vznikem příliš tlustých vrstev intermetalických sloučenin na rozhraní dvou materiálů. Pro vznik kvalitního pájeného spoje je vrstva intermetalických sloučenin nezbytná. S postupujícím časem, v závislosti na teplotě, tyto vrstvy narůstají, čímž se zhoršuje kvalita spoje, zvyšuje se jeho křehkost a zmenšuje pevnost. Dále se zhoršují jeho elektrické vlastnosti, snižuje životnost a zhoršuje se smáčivost povrchu. Tyto intermetalické vrstvy vznikají difúzí mezi dvěma materiály, kde se vytváří chemické a fyzikální vazby. Tloušťka intermetalické vrstvy závisí na teplotě, při vyšší teplotě se její růst urychluje. Za normálních okolností se tloušťka těchto vrstev pohybuje v řádu jednotek mikrometrů. V případě tlustších vrstev se mohou vytvořit praskliny a spoj může ztratit své mechanické a elektrické vlastnosti.

Difúze začíná ve chvíli, kdy dojde ke smáčení povrchu. Její rychlost a tloušťka vytvořené vrstvy závisí na materiálech spojovaných komponentů a na teplotě.

U povrchových úprav DPS se stárnutí projevuje především u HALu a u úpravy imerzním cínem. Zde vznikají na rozhraní mědi a cínu intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn , a také zde může dojít ke vzniku oxidů na povrchu. U povrchové úpravy ENIG je vzniku vrstvy intermetalických sloučenin zlata a mědi zabráněno mezivrstvou niklu.

Proces stárnutí se dá urychlit pomocí tzv. izotermálního stárnutí, kdy je materiál vystaven po určitou dobu zvýšené konstantní teplotě, což značně urychluje vznik intermetalických sloučenin, zvyšuje rychlost oxidace a tedy i proces stárnutí.

5.1 Oxidace povrchu

Během stárnutí materiálu dochází na povrchu k tvorbě vrstvy oxidů. Následkem nárůstu vrstvy oxidů může dojít ke zhoršení smáčivosti povrchu. Při pájení by měla být tato vrstva odstraněna pomocí tavidla, které by mělo zabránit i následné reoxidaci. Nejvíce se oxidace projevuje na povrchu čisté mědi, pokud je povrch pokrytý cínem nebo pájkou je oxidace méně výrazná.

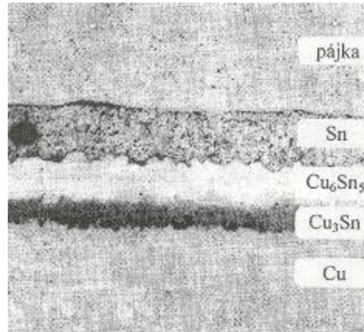
V rámci povrchových úprav je na oxidaci povrchu nejnáchylnější imerzní cín, nejméně se oxidace naopak projevuje u technologie ENIG, zde je oxidaci zabráněno nanesením tenké vrstvy zlata na povrch.

5.2 Intermetalické sloučeniny

Pájený spoj vzniká difúzí částic pájky do materiálu, čímž vznikne difúzní vrstva na rozhraní pájka-pájecí ploška, kde vznikají intermetalické sloučeniny, zde jsou to většinou intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn . Tato vrstva je nezbytná pro vznik kvalitního pájeného spoje. Pokud ovšem intermetalická vrstva nabude příliš velké tloušťky, může negativně ovlivnit vlastnosti pájeného spoje, především jeho pevnost a křehkost. Dále také

může ovlivnit jeho elektrické vlastnosti. V konečném důsledku může vést až k nefunkčnosti pájeného spoje.

Na obrázku 5.1 můžeme vidět příklad vzniku intermetalických sloučenin na přechodu měď-cín, konkrétně zde vznikají sloučeniny Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn .



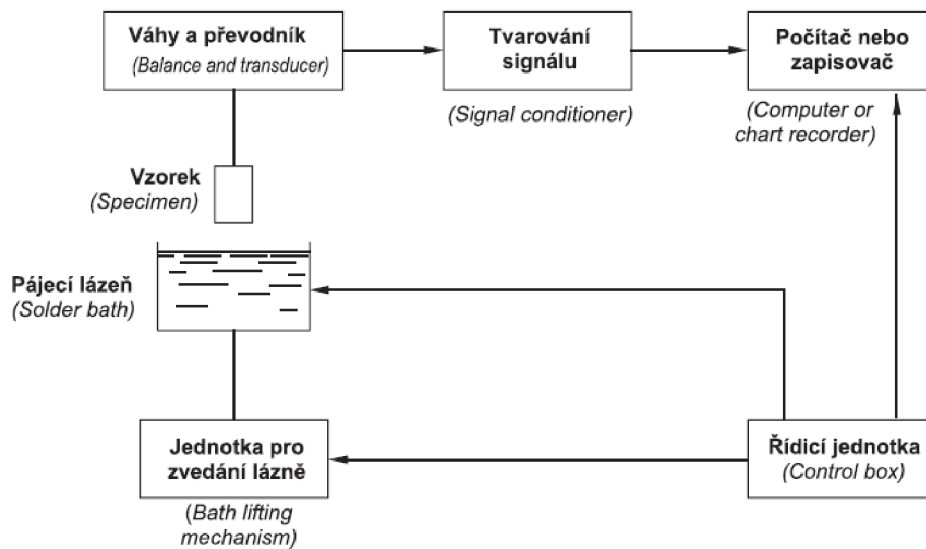
Obr 5.1 Intermetalické vrstvy při pájení [1]

Vznik příliš velké vrstvy těchto sloučenin je způsoben především příliš vysokou teplotou při pájení, příliš dlouhou dobou pájení a tepelným namáháním při provozu. Tloušťku vrstvy také ovlivňuje použitý materiál pájky a materiál pájecí plošky, případně vývodu součástky. Intermetalické vrstvy rostou i dále při normální provozní teplotě, ale velmi pomalu, pokud je vrstva pájky velmi tenká, může se stát, že je zcela nahrazena vrstvou intermetalických sloučenin.

6 METODIKA MĚŘENÍ

6.1 Metoda smáčecích vah

Metoda smáčecích vah slouží k měření smáčecích charakteristik vývodů součástek, či substrátu. Tato metoda se používá především pro vývodové součástky, ale je možné ji použít i pro SMD součástky. Při této metodě měření se vzorek s naneseným tavidlem ponoří do lázně s roztavenou pájkou. Nádoba s roztavenou pájkou leží na zdvihacím mechanismu. Při měření se tedy zvedá tato nádoba, dokud se vzorek neponoří do pájky. Jedná se o velmi přesnou metodu, při které je vzorek zavěšen na velmi citlivých mikrováhách, které měří síly působící na měřený vzorek. Tomuto zařízení se říká meniskograf, jeho schéma můžeme vidět na obrázku 6.1.



Obr 6.1 Schéma meniskografu [4]

Pomocí meniskografu se dá nastavovat rychlost ponoru, hloubka ponoru, prodleva v lázni a teplota lázně.

Testování probíhá tak, že se na vzorek nanese tavidlo, odstraní se přebytek tavidla, a poté se zavěsí na siloměr. Ze začátku na vzorek žádná smáčecí síla nepůsobí. Smáčecí síla začíná působit při styku s pájkou. Pokud se vzorek ponoří do pájky dostatečně rychle, tak se nesmočí, případně se smočí jen velmi málo. Při ponoření by měl vzorek svírat s rovinou pájky úhel 90° . Během ponoření začne na vzorek působit povrchové napětí a Archimédova vztlačková síla, které vytlačují vzorek ven z pájky. Po ponoření pájka stoupá po povrchu vzorku, dokud opět nevytvoří rovnou hladinu. Jakmile se začne vzorek smáčet, otočí se směr působení povrchového napětí, které začne vzorek stahovat do pájky. Pájka poté vystoupá do určité výšky, dané pájitelností vzorku. Tato výška závisí na povrchovém napětí a hustotě pájky. [10]

Tato metoda měří výslednici sil působící na vzorek. Tyto síly můžeme vyjádřit pomocí rovnice 6.1:

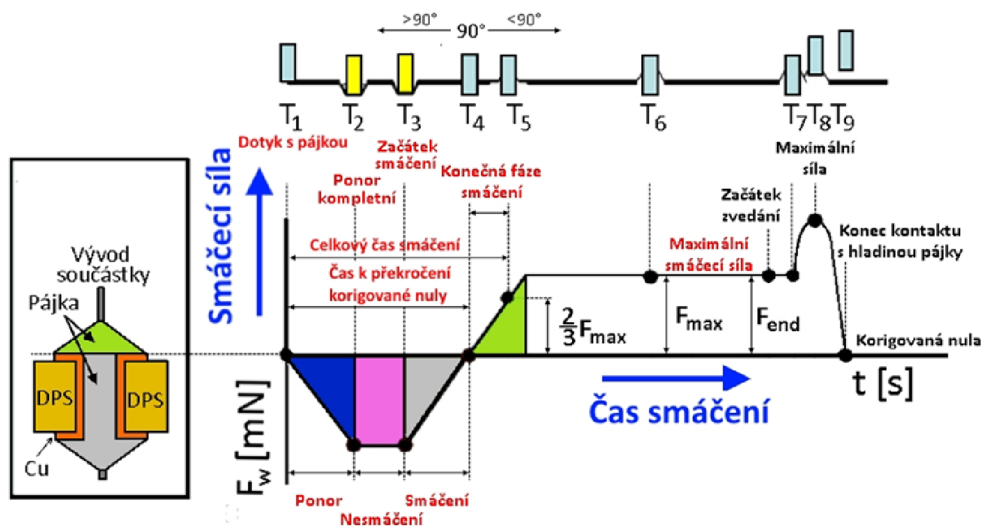
$$F = \gamma p \cos\theta - g\rho V \quad (6.1)$$

kde F vyjadřuje rovnovážnou smáčecí sílu v N, γ je povrchové napětí pájky v Nm^{-1} , p je obvod vzorku v m, θ je smáčecí úhel ve stupních, g je gravitační zrychlení v ms^{-2} , ρ je hustota pájky v kgm^{-3} a V představuje objem ponořené části vzorku v m^3 .

Hodnoty $g\rho V$ vyjadřují Archimédovu vztlačovou sílu, tedy jsou určeny objemem ponořené části vzorku do roztavené pájky, která vzorek vytlačuje ven z pájky. Druhá část pravé strany rovnice vyjadřuje sílu smáčecí. V této rovnici se mění během měření pouze hodnota smáčecího úhlu, největší hodnoty tedy dosáhne smáčecí síla, pokud je smáčecí úhel roven 0° .

6.2 Smáčecí charakteristiky

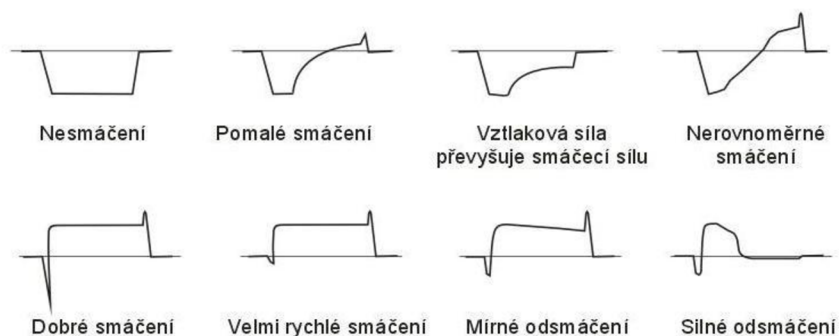
Na obrázku 6.2 vidíme smáčecí charakteristiku vzorku měřeného metodou smáčecích vah.



Obr 6.2 Průběh měření metodou smáčecích vah [8]

V bodě T1 dochází k prvnímu styku vzorku s roztavenou pájkou. V bodě T2 dochází k úplnému ponoření vzorku do pájky. Postupně se začíná vzorek smáčět, což vidíme v bodě T3, kde začíná smáčecí síla působit opačným směrem než doposud. Poté v bodě T4 se hladina pájky vyrovnává a v bodě T5 pájka začíná po vzorku vzlínat vzhůru. V bodě T4 se síla smáčecí a síla vztlačová vyrovnají. V bodě T6 dosahuje smáčecí síla svého maxima a smáčecí úhel svého minima a blíží se nule. Bod T7 představuje začátek vytahování vzorku z pájky, v bodě T8 působí na vzorek maximální síla. V bodě T9 poté dochází k úplnému vytažení

vzorku z pájky, dále už je jen výsledný stav. Za maximem v bodě T6 by velikost působící síly měla zůstat konstantní, může ovšem dojít k odsmačeni, což způsobí, že bude křivka klesat.



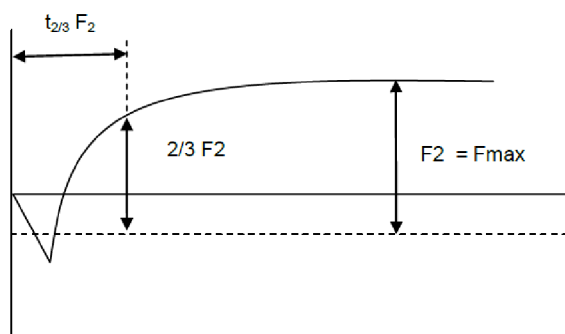
Různé druhy smáčecích charakteristik jsou zobrazeny na obrázku 6.3.

Abychom získali hodnoty smáčecí síly, provádí se korekce nulové osy. To se provádí tak, že se spočítá vztlaková síla z rovnice 6. 2:

$$F = \rho g V \quad (6. 2)$$

kde F představuje vztlakovou sílu v N, ρ udává hustotu pájky v kgm^{-3} , g je gravitační zrychlení v ms^{-2} a V je objem ponořeného vzorku v m^3 .

Hodnotu získanou z této rovnice odečteme od nulové osy, čímž získáme novou korigovanou osu, které se říká korigovaná nula. Tato korigovaná osa se bude nacházet pod nulovou osou přístroje. Od této osy se poté měří všechny doby smáčení a smáčecí síly. Především jde o hodnotu maximální smáčecí síly, ze které se dopočítá hodnota odpovídající $2/3$ této síly označené jako $F_{2/3}$, a zjistí se čas, při kterém je dosaženo této síly, tento čas se značí $t_{2/3}$. Tyto síly můžeme vidět vyznačené na obrázku 6.4. Výsledky se poté vyhodnocují podle poměru těchto dvou hodnot, tedy $F_2/t_{2/3}$. Tento poměr by měl být co největší, síla $F_{2/3}$ by tedy měla být dosažena v co nejkratším čase. Z tohoto poměru se tedy nakonec určuje smáčivost materiálu.



Obr 6.4 Síla $F_{2/3}$ v čase $t_{2/3}$ [2]

6.3 Stripování cínu

Chemický proces selektivního odstraňování vrstvy cínu z mědi. Používají se zpravidla směsi organických kyselin [6]. Stripování lze provádět jednostupňovým nebo dvoustupňovým systémem. Při jednostupňovém systému dochází k odstranění vrstvy cínu i vrstvy intermetalických sloučenin až na čistou měď. Nevýhodou může být nerovnoměrné odstraňování vrstvy cínu a intermetalické vrstvy, výsledný měděný povrch tak může být nerovnoměrný a může vykazovat různá napadení. U dvoustupňové metody se používají dva různé stripovací roztoky, přičemž první odstraní vrstvu cínu a druhý odstraňuje intermetalickou vrstvu až na čistou měď.

6.3.1 Stripovací roztok TinSolv™ 1000

Tento roztok stripuje vrstvu cínu až na vrstvu intermetalických sloučenin. Používá se v prvním stupni dvoustupňového stripování.

6.3.2 Stripovací roztok Solderstrip™ TS Omega

Solderstrip™ TS Omega je stripovací roztok, který rovnoměrně stripuje intermetalickou vrstvu až na čistou měď. Používá se při druhém stupni dvoustupňového stripování.

6.4 Stripování zlata

Pro stripování zlata byl použit roztok kyanidu draselného. Vzhledem k tomu, že kyanid je silný jed, je důležité dodržovat při práci s ním bezpečnostní opatření, jako je práce v ochranných rukavicích odsávání, použití ochranného štítu apod.. Po vytažení vzorku z roztoku je nutný jeho několikanásobný oplach v nádobách s deionizovanou vodou.

7 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

7.1 Měřené vzorky

Pro měření byly použity vzorky s různými povrchovými úpravami. Tyto vzorky byly dodány firmou Gatema. Jednalo se o vzorky s povrchovými úpravami bezolovnatý HAL, ENIG a imerzní cín na oboustranně plátovaném laminátu FR4. Velikost těchto vzorků byla 5 mm x 20 mm x 1 mm. S měřeními vzorky bylo nutné pracovat v rukavicích, aby se zabránilo nanesení nečistot a potu především u vzorků s povrchovou úpravou imerzním cínem, která je velmi citlivá. Ukázka měřených vzorků je na obrázku 7.1.

Dodané vzorky byly měřeny:

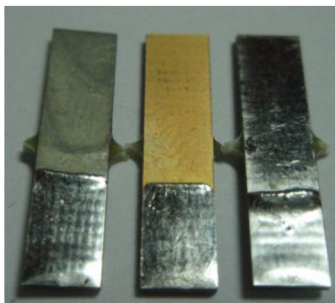
- Bez vystavení izotermálnímu stárnutí
- Po vystavení izotermálnímu stárnutí 1 h
- Po vystavení izotermálnímu stárnutí 2 h
- Po 1 průchodu přetavovací pecí s teplotním profilem pro bezolovnaté pájení
- Po 2 průchodech přetavovací pecí s teplotním profilem pro bezolovnaté pájení
- Po 1 průchodu přetavovací pecí s teplotním profilem pro olovnaté pájení
- Po 2 průchodech přetavovací pecí s teplotním profilem pro olovnaté pájení

U povrchové úpravy imerzním cínem byly navíc vzorky měřeny:

- Po odstripování vrstvy cínu, přičemž byla ponechána intermetalická vrstva
- Po 1 průchodu přetavovací pecí a následném odstripování vrstvy cínu s teplotním profilem pro bezolovnaté pájení
- Po 2 průchodech přetavovací pecí a následném odstripování vrstvy cínu s teplotním profilem pro bezolovnaté pájení

U povrchové úpravy ENIG bylo provedeno měření:

- Po odstripování vrstvy zlata, přičemž byla ponechána vrstva niklu
- Po 1 průchodu přetavovací pecí odstripování vrstvy zlata s teplotním profilem pro bezolovnaté pájení
- Po 2 průchodech přetavovací pecí odstripování vrstvy zlata s teplotním profilem pro bezolovnaté pájení



Obr 7.1 Vzorky povrchových úprav (imerzní cín, ENIG, bezolovnatý HAL)

Dále byly měřeny dva druhy povrchové úpravy ENIG (dále označované 1. ENIG a 2. ENIG), přičemž u 2. ENIGu byly měřeny charakteristiky i po vystavení izotermálnímu stárnutí a po průchodech přetavovací pecí, zatímco u 1. ENIGu byla měřena jen smáčecí charakteristika pro nestárnuté vzorky. Rozdíl mezi těmito dvěma druhy je v množství příměsí fosforu ve vrstvě niklu, které je větší u 1. ENIGu. Smáčecí charakteristiky těchto dvou typů technologie ENIG byly poté porovnány.

Tab 7.1 Přehled měření pro jednotlivé povrchové úpravy

ENIG	Nestárnuté	1x Reflow Pb	2x Reflow Pb	1x Reflow Pb free	2x Reflow Pb free
ENIG	Vystavené izotermálnímu stárnutí 155 °C/1 h	Vystavené izotermálním u stárnutí 155 °C/2 h	Nestárnuté po odstripování vrstvy zlata	1x Reflow Pb free -> odstripována vrstva zlata	2x Reflow Pb free -> odstripována vrstva zlata
Imerzní cín	Nestárnuté	1x Reflow Pb	2x Reflow Pb	1x Reflow Pb free	2x Reflow Pb free
Imerzní cín	Vystavené izotermálnímu stárnutí 155 °C/1 h	Vystavené izotermálním u stárnutí 155 °C/2 h	Nestárnuté po odstripování vrstvy cínu	1x Reflow Pb free -> odstripována vrstva cínu	2x Reflow Pb free -> odstripována vrstva cínu
Bezolovnatý HAL	Nestárnuté	1x Reflow Pb	2x Reflow Pb	1x Reflow Pb free	2x Reflow Pb free
Bezolovnatý HAL	Vystavené izotermálnímu stárnutí 155 °C/1 h	Vystavené izotermálním u stárnutí 155 °C/2 h	-	-	-

7.2 Izotermální stárnutí vzorků

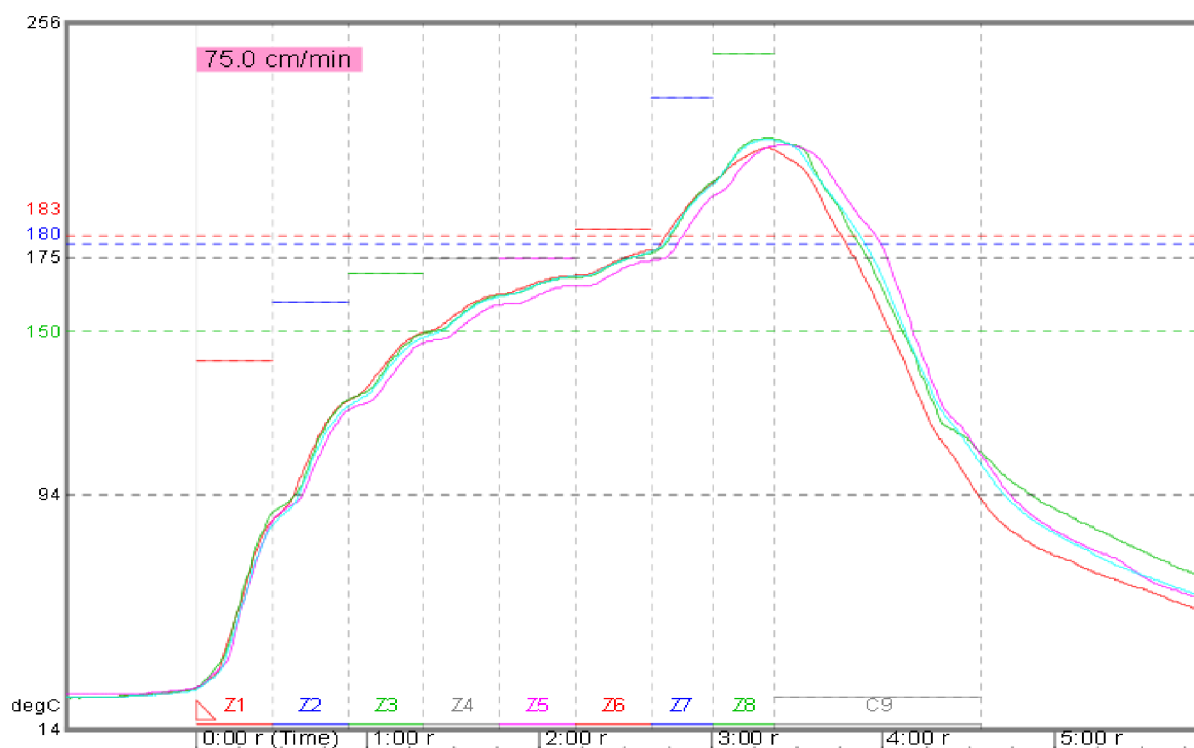
Vzorky, které měly být vystaveny izotermálnímu stárnutí byly vloženy do sušičky plošných spojů HS61A. Zde byla nastavena teplota 155 °C. Vzorky zde byly ponechány po dobu 1 h, popřípadě 2 h. Po vyjmutí ze sušičky se musely vzorky nechat aklimatizovat na teplotu v laboratoři.

7.3 Průchod vzorků přetavovací pecí

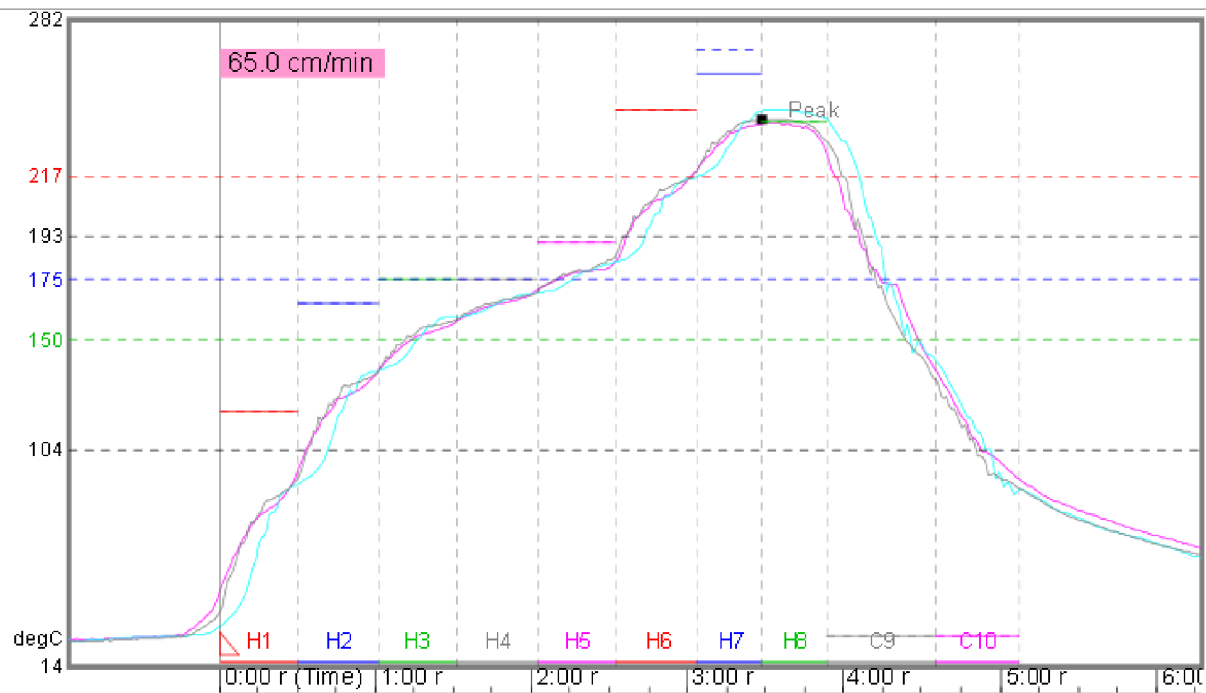
Ve spolupráci s firmou Honeywell byly vzorky vystaveny průchodům přetavovací pecí, a to s nastaveným teplotním profilem pro olovnaté nebo bezolovnaté pájení. Vzorky poté byly měřeny po jednom, případně po dvou průchodech. Použité teplotní profily jsou zobrazeny na obrázcích 7.2 a 7.3, uvedené teplotní profily nejsou měřeny přímo pro použité vzorky, ale pro běžné desky pájené ve firmě Honeywell. Peak při nastavení teplotního profilu pro olovnaté pájení byl přibližně 216 °C, při nastavení profilu pro bezolovnaté pájení byl peak asi 245 °C. Nastavené teploty zářičů v peci jsou uvedeny v tabulce 7.2.

Tab 7.2 Nastavení teplot zářičů pro průchod přetavovací pecí

	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	T6 [°C]	T7 [°C]	T8 [°C]
Olovnaté pájení	140	160	170	175	175	185	230	245
Bezolovnaté pájení	120	165	175	175	190	245	260	240



Obr 7.2 Použitý teplotní profil pro olovnaté pájení



Obr 7.3 Použitý teplotní profil pro bezolovnaté pájení

7.4 Stripování cínu

Pro stripování cínu byla využita dvoustupňová metoda. Měření probíhalo po prvním stupni odstripování. Pro tuto metodu bylo využito stripovacího roztoku TinSolvTM 1000. Pro první stupeň byl použitý stripovací roztok TinSolvTM 1000, který odstripoval vrstvu cínu, ale zanechal intermetalickou vrstvu.

Bylo měřeno 10 vzorků s povrchovou úpravou imerzním cínem. Stripování probíhalo za teploty 23 °C po dobu 3 minut. Po odstripování vrstvy cínu byly změřeny smáčecí charakteristiky intermetalické vrstvy. Dále byly měřeny vzorky, které prošly 1x a 2x přetavovací pecí s nastaveným profilem pro bezolovnaté pájení a následně jim byla odstripována vrstva cínu. Poté byly opět změřeny jejich smáčecí charakteristiky.



Obr 7.4 Pracoviště pro stripování cínu

Během stripování cínu byl také měřen úbytek hmotnosti. Hmotnost vzorků byla měřena před začátkem stripování, po 10 s, 20 s, 40 s, 60 s, 120 s a 180 s. Před začátkem stripování byly vzorky vloženy na 5 minut do nádoby s deionizovanou vodou, aby bylo zabráněno vlivu nasáknutí materiálu po vložení do stripovacího roztoku, jinak by byla zkreslena hmotnost vzorků. Poté byly vzorky ponořeny do izopropylalkoholu, který na sebe navázal přebytečnou vodu. Měření úbytku hmotnosti při stripování probíhalo na analytických vahách PIONEER™ (OHAUS). Z naměřených hodnot byl poté vytvořen graf závislosti úbytku hmotnosti na čase stráveném ve stripovacím roztoku. Z úbytku hmotnosti byla vypočítána tloušťka odstripované vrstvy cínu v μm pomocí rovnice 7. 1 a 7. 2:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (7. 1)$$

$$tl = \frac{V}{S} \quad (7. 2)$$

kde V je objem odstripovaného cínu v m^3 , m je hmotnost odstripovaného cínu v kg, ρ je hustota cínu v kg/m^3 , tl je tloušťka odstripované vrstvy cínu a S je povrch vrstvy cínu v m^2 .

7.5 Stripování zlata

Pro stripování zlata byl použit kyanid draselný. Po odstripování vrstvy zlata je ponechána pouze vrstva niklu, která začne na vzduchu ihned oxidovat, což způsobí zhoršení smáčecích charakteristik.

Stripování zlata bylo nejprve vyzkoušeno na vzorcích přibližně 6 měsíců starých, které byly měřeny po různě dlouhé době strávené ve stripovacím roztoku. Konkrétně po 5 s, 10 s, 15 s, 20 s a 25 s. Každé měření bylo provedeno pro 5 vzorků, přičemž před měřením smáčivosti byl zjištěn úbytek hmotnosti, ze kterého byla vypočítána tloušťka odstripované vrstvy zlata pomocí rovnice 7. 1 a 7. 2. Po vytažení vzorků ze stripovacího roztoku došlo k oplachu v deionizované vodě. Následně byly vzorky vloženy do sušičky plošných spojů na 15 minut při teplotě $60\text{ }^\circ\text{C}$, především proto, aby nedošlo k ovlivnění měření hmotnosti vlivem nasáknutí materiálu.

Dále byly měřeny nové vzorky po dodání a po 1 a 2 průchodech přetavovací pecí s profilem pro bezolovnaté pájení. Tyto vzorky byly ve stripovacím roztoku po dobu 20 s. Zde bylo provedeno měření pokaždé pro 6 vzorků. Po vyjmutí ze stripovacího roztoku byly vzorky opět opláchnuty v nádobě s deionizovanou vodou a následně vloženy do sušičky plošných spojů.

Při stripování ENIGu u vzorků po průchodu přetavovací pecí nedošlo v některých případech k odstripování vrstvy zlata, u vzorků po dvou průchodech již zlato vydrželo na všech vzorcích. Byla proto provedena prvková analýza, aby byl zjištěn důvod proč k odstripování nedošlo.

7.6 Měření smáčecích charakteristik

Pro každé měření bylo použito 20 vzorků, u stripovaných vzorků imerzního cínu 10. Na vzorky bylo nanášeno VOC-free tavíadlo Kester 979T, následně byl odstraněn jeho přebytek a poté byly vzorky umístěny do meniskografu MULTICORE Must I, kde byl vzorek ponořen do roztavené pájky SAC305.

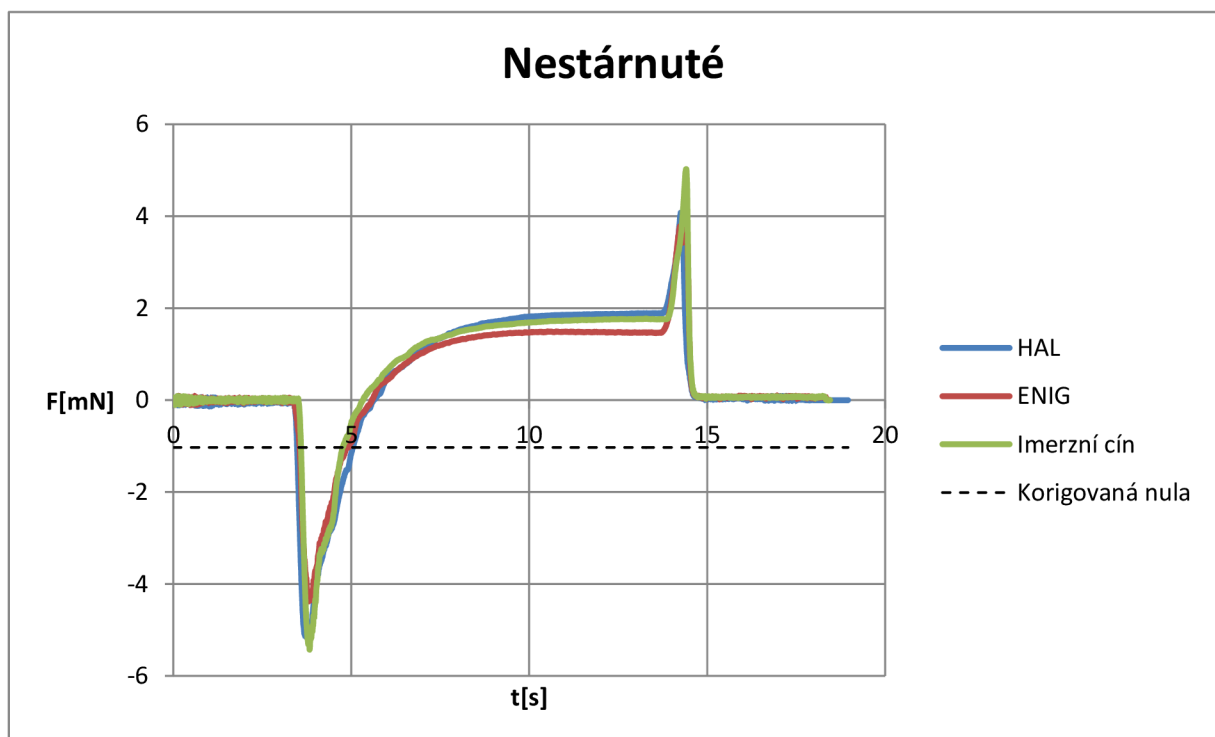
Meniskograf byl nastaven na tyto parametry:

- Teplota pájky: 245 °C
- Ponor: 3 mm
- Prodleva v lázni: 10 s
- Rychlost ponoru: 10 mm·s⁻¹.

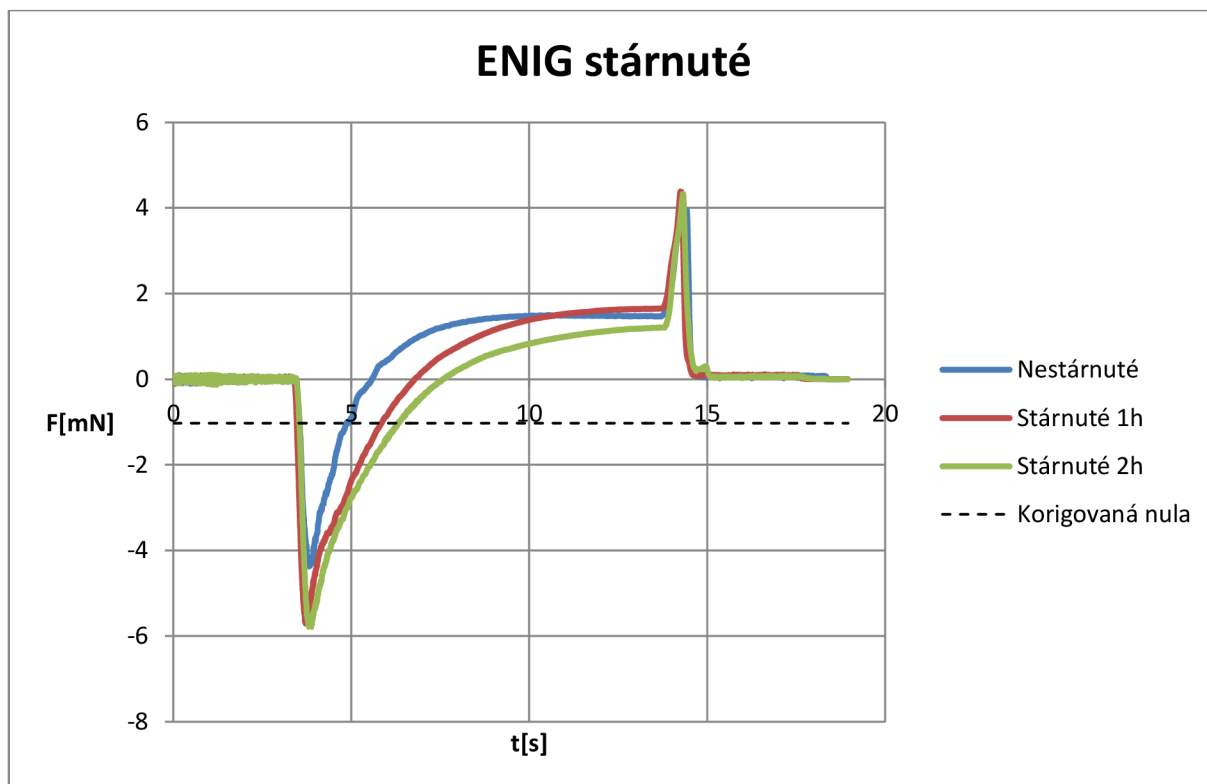
Po naměření veškerých hodnot se vypočítal průměr a vytvořil konečný graf smáčecí charakteristiky.



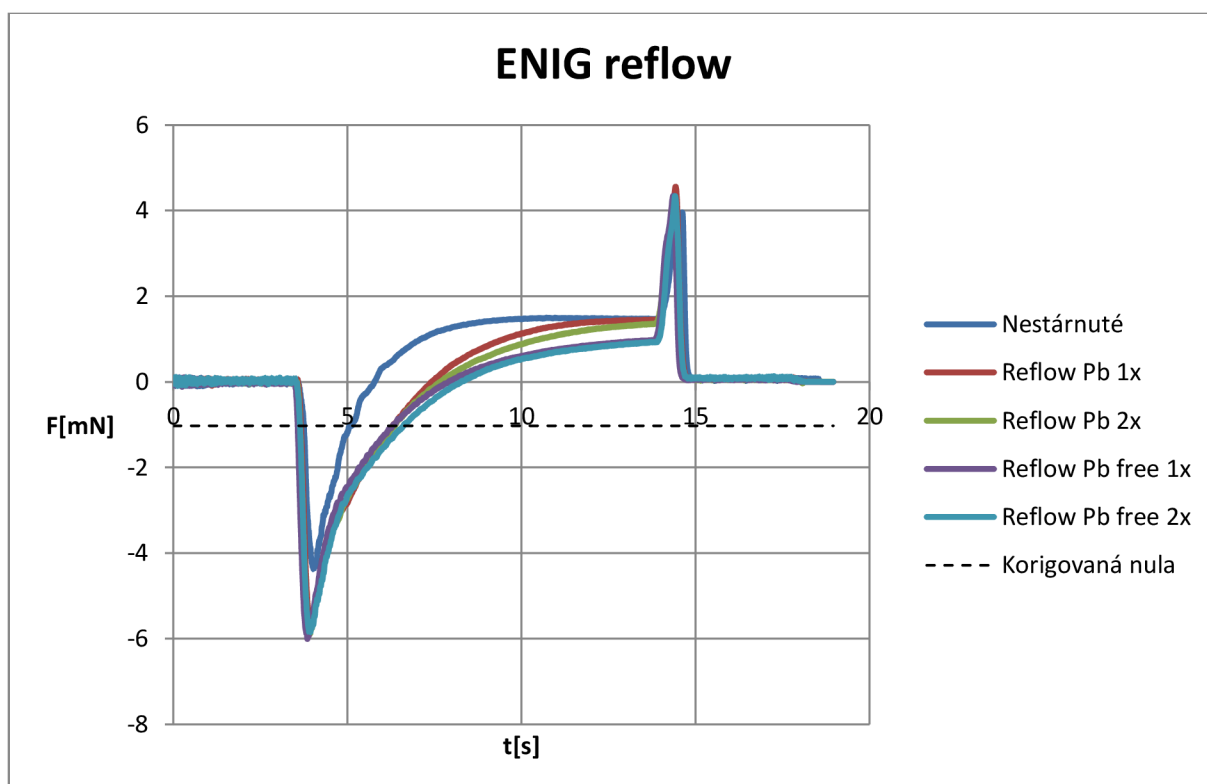
Obr 7.5 Měřicí pracoviště pro měření smáčivosti



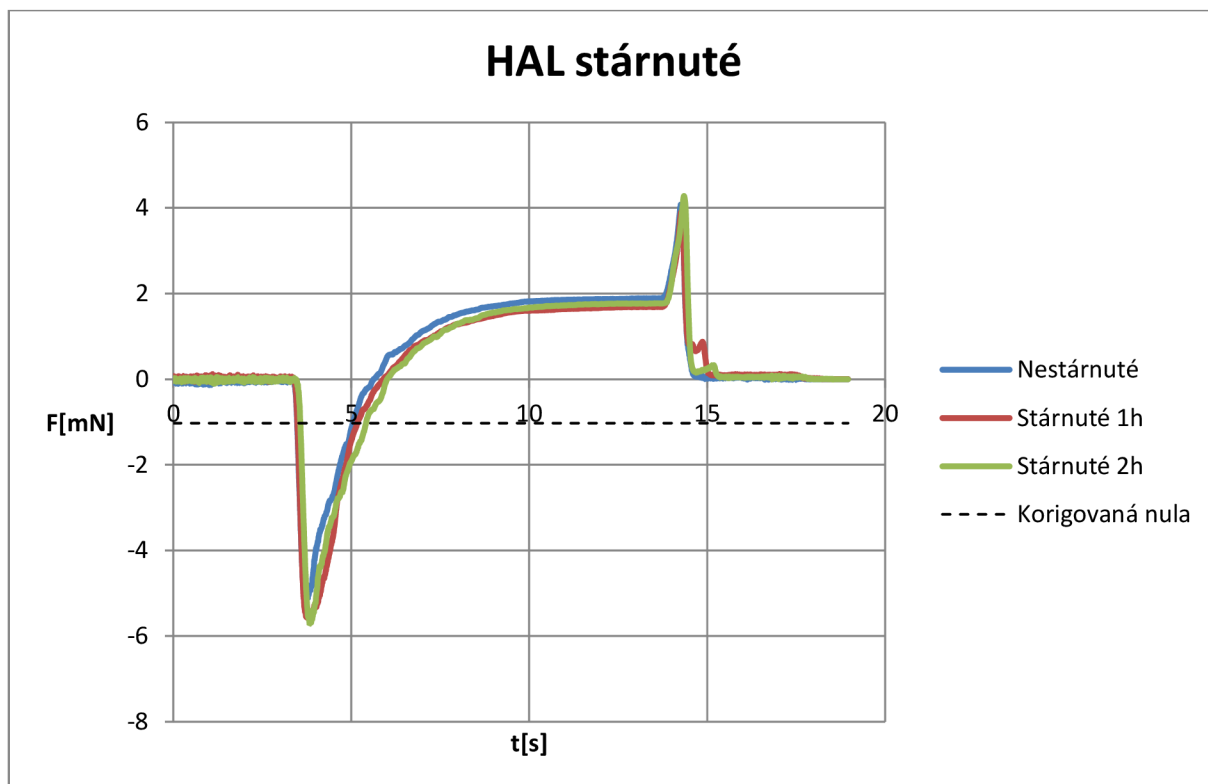
Obr 7.6 Smáčecí charakteristiky nestárnutých povrchových úprav



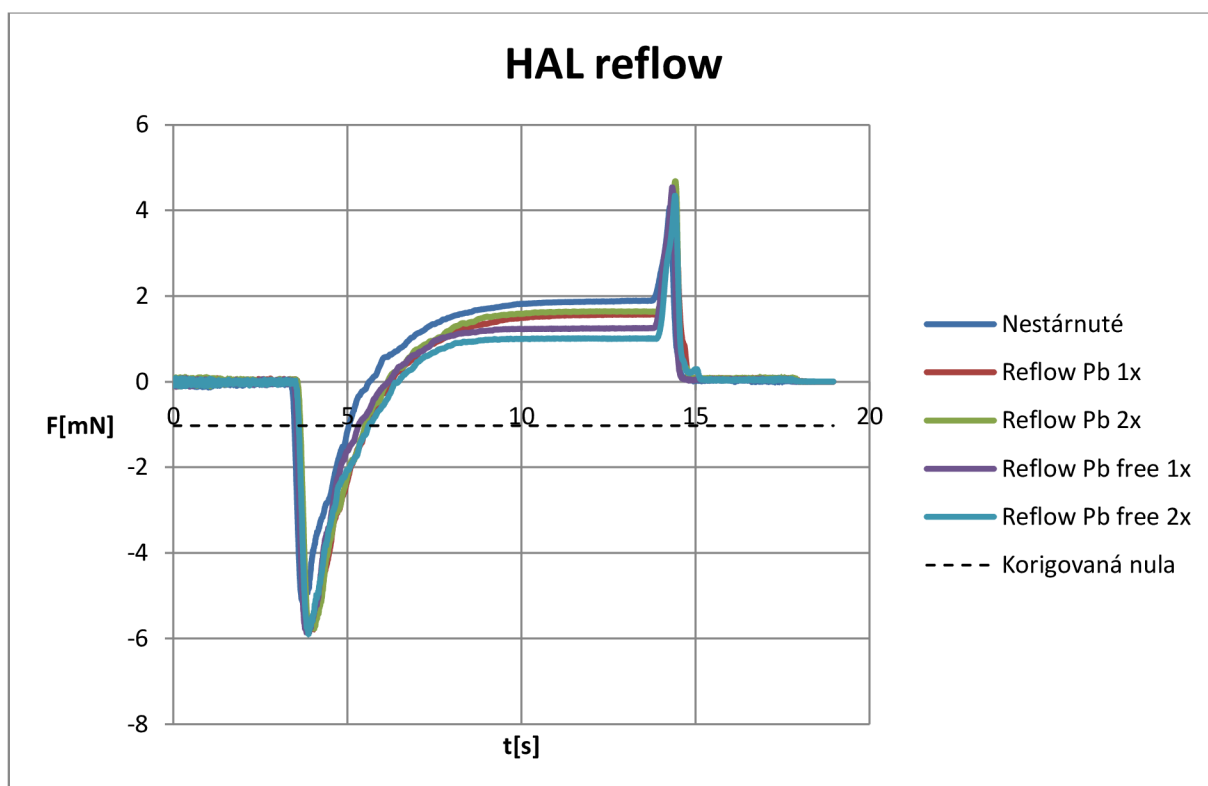
Obr 7.7 Smáčecí charakteristiky ENIGu po izotermálním stárnutí



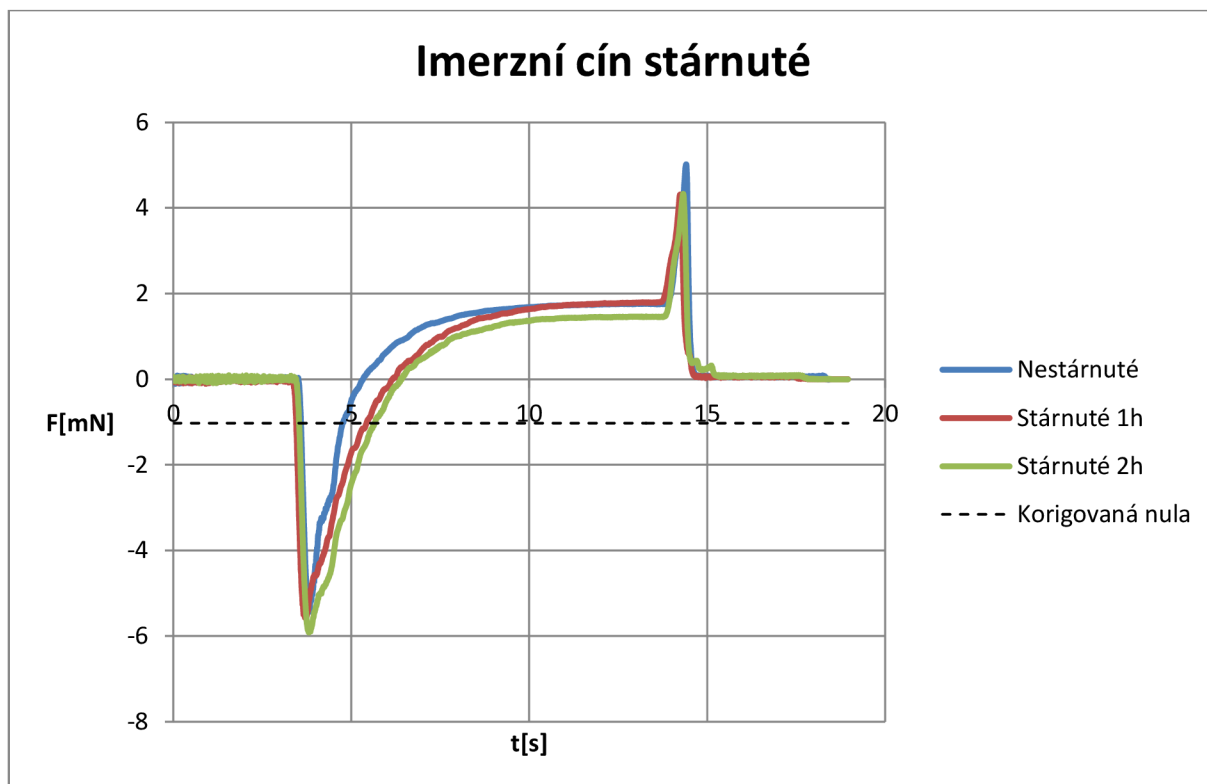
Obr 7.8 Smáčecí charakteristiky ENIGu po průchodech přetavovací peci



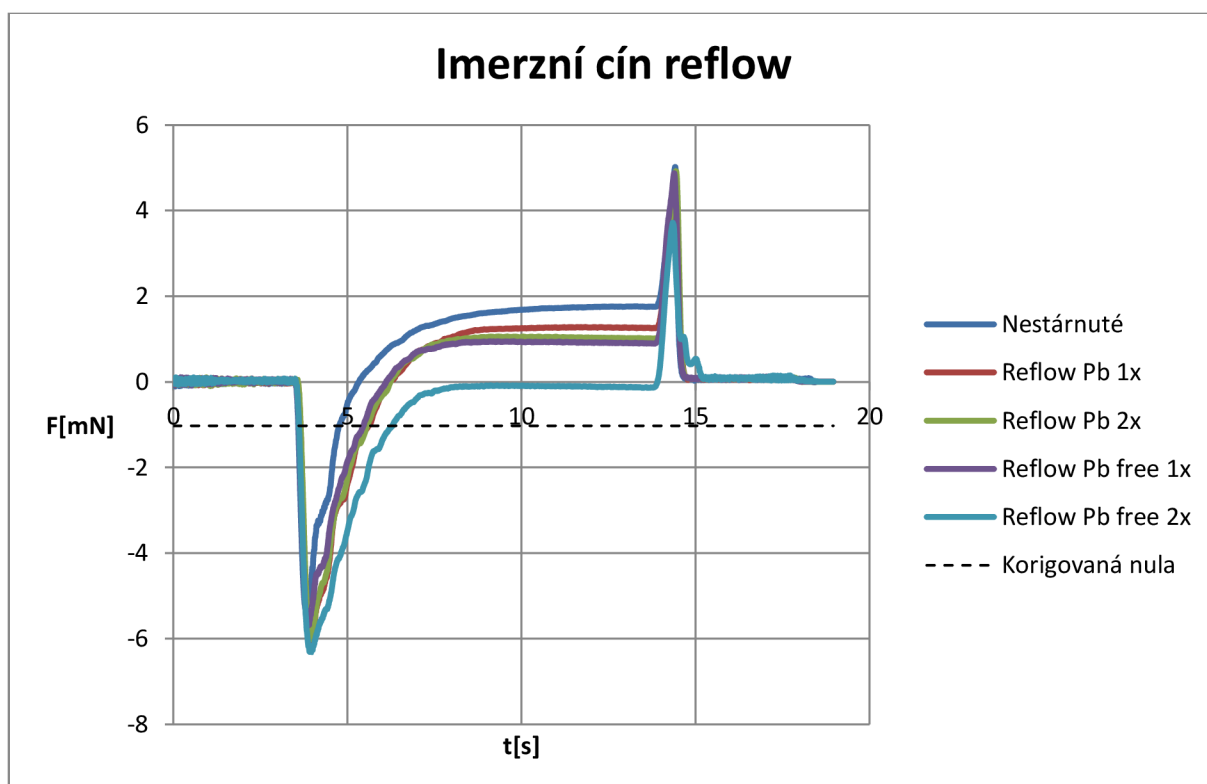
Obr 7.9 Smáčecí charakteristiky bezolovnatého HALu po izotermálním stárnutí



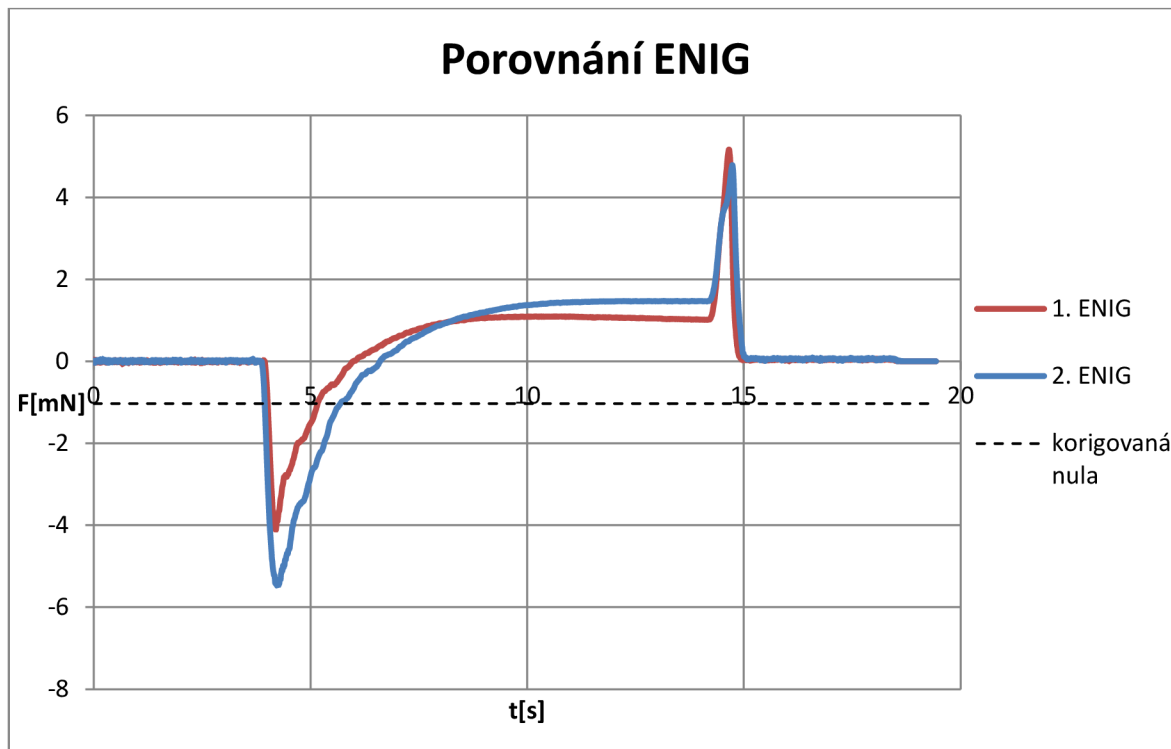
Obr 7.10 Smáčecí charakteristiky bezolovnatého HALu po průchodech přetavovací pecí



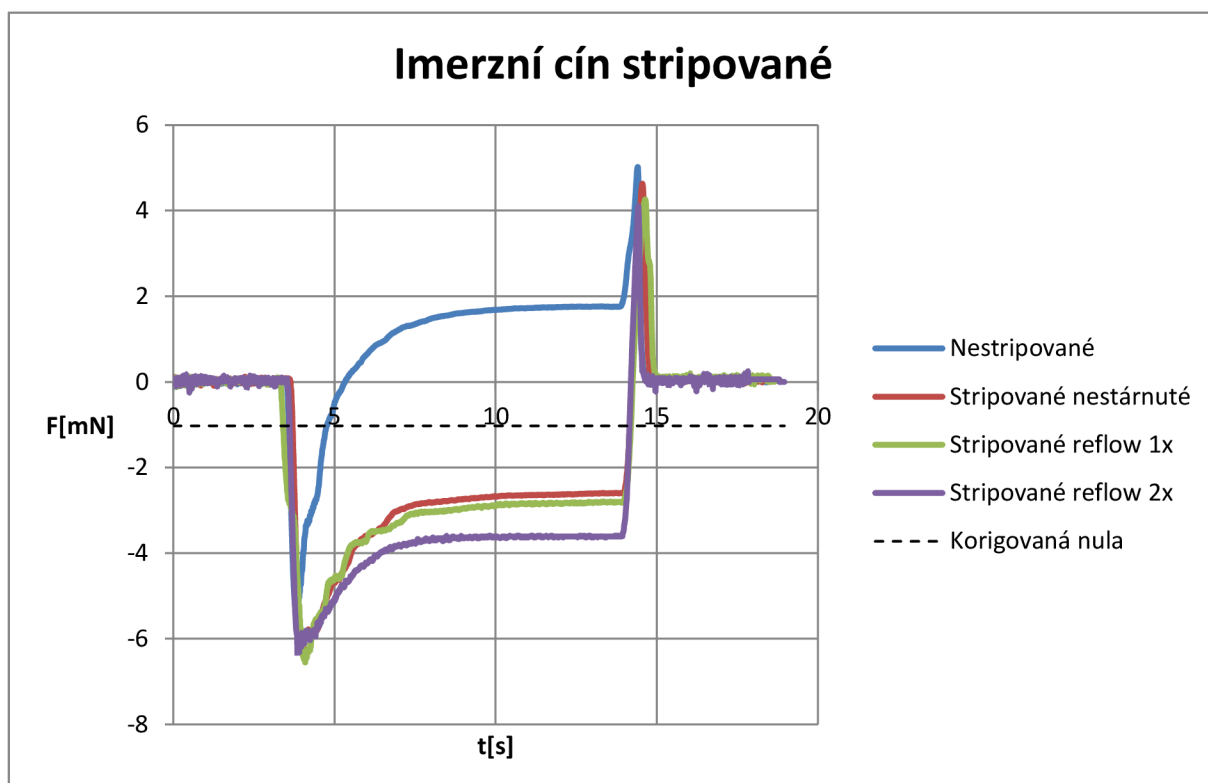
Obr 7.11 Smáčecí charakteristiky imerzního cínu po izotermálním stárnutí



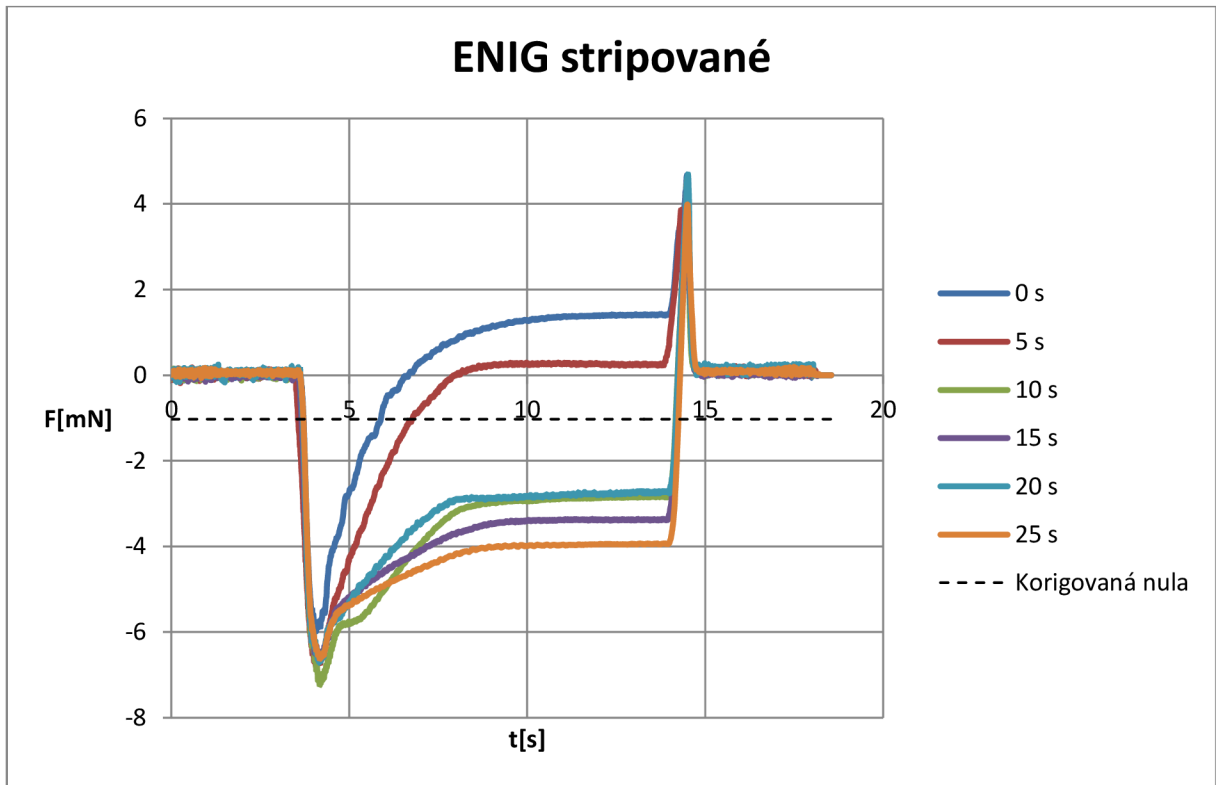
Obr 7.12 Smáčecí charakteristiky imerzního cínu po průchodech přetavovací pecí



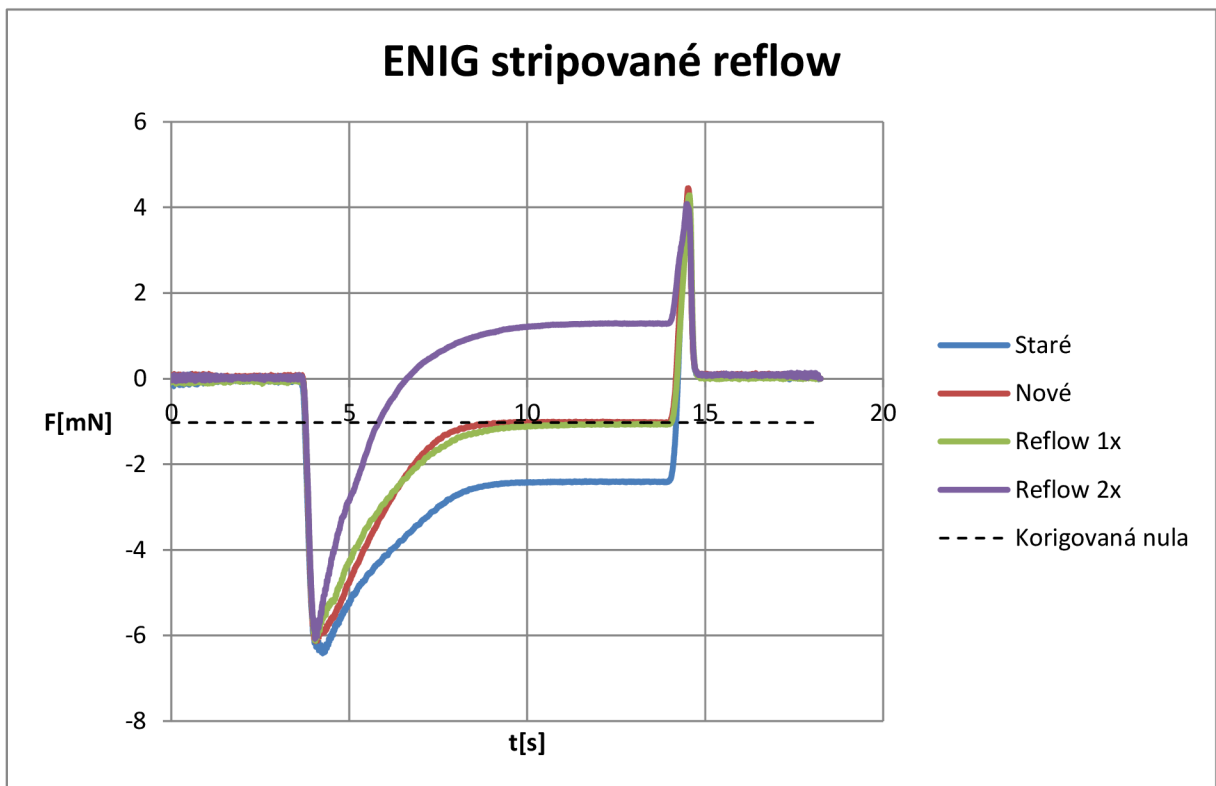
Obr 7.13 Smáčecí charakteristika srovnání dvou druhů povrchové úpravy ENIG



Obr 7.14 Smáčecí charakteristika stripovaných vzorků imerzního cínu

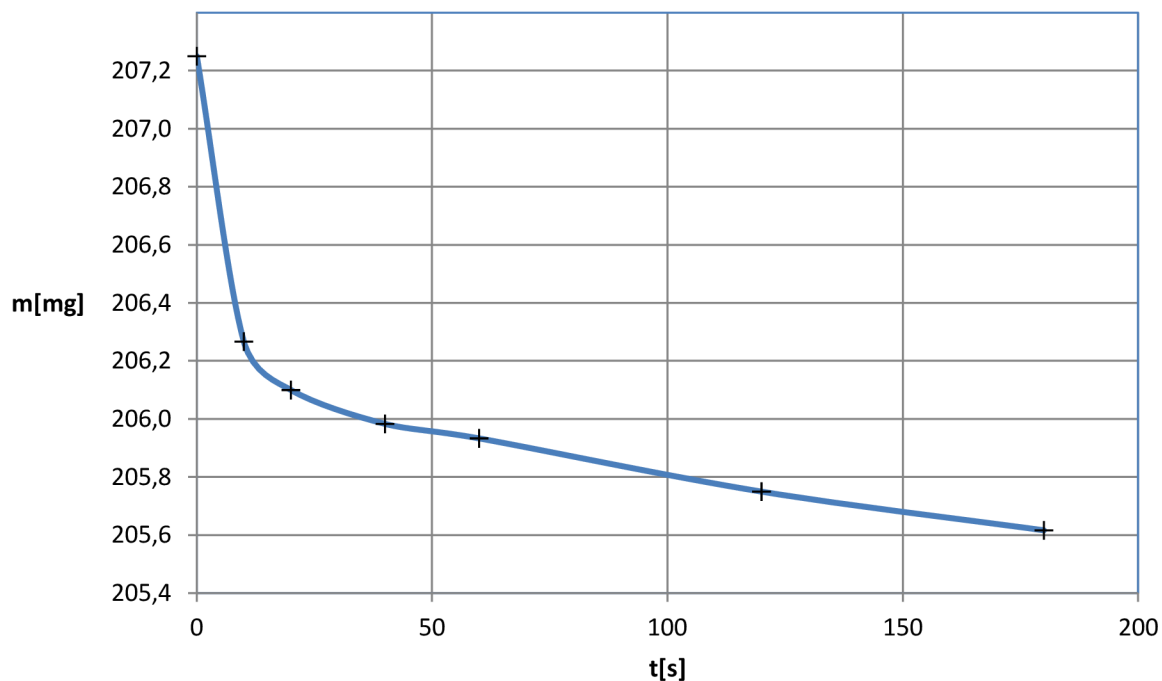


Obr 7.15 Smáčeí charakteristiky stripovaných vzorků ENIGu v závislosti na čase v lázni



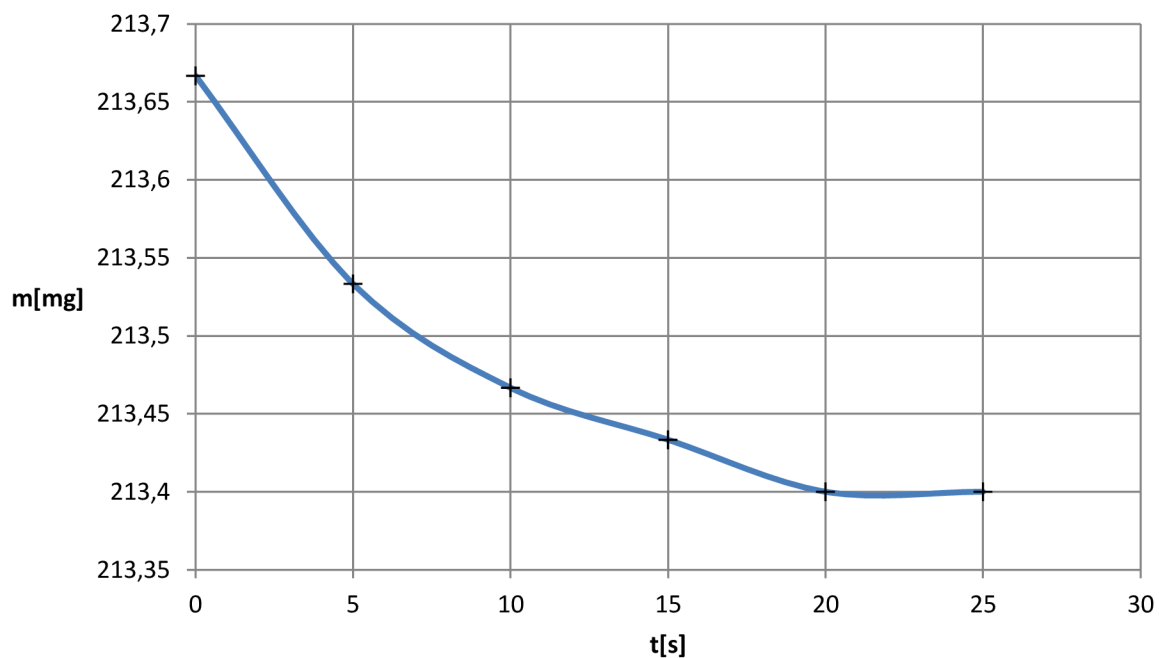
Obr 7.16 Smáčeí charakteristiky stripovaného ENIGu po průchodech přetavovací peci

Imerzní cín - závislost úbytku hmotnosti na čase



Obr 7.17 Imerzní cín - závislost úbytku hmotnosti na čase ve stripovacím roztoku

ENIG - závislost úbytku hmotnosti na čase



Obr 7.18 ENIG - závislost úbytku hmotnosti na čase ve stripovacím roztoku

7.7 Naměřené a vypočítané hodnoty

Naměřené a vypočítané hodnoty smáčecích charakteristik jsou uvedeny v tabulkách 7.2 – 7.8. Hodnoty pro měření úbytku hmotnosti při stripování cínu jsou uvedeny v tabulce 7.9 a naměřené hodnoty pro měření úbytku zlata jsou v tabulce 7.11. Z naměřených hodnot se pomocí rovnice 6.2 vypočítala Archimédova vztlaková síla, podle objemu ponořené části vzorku do pájky. Hodnota této síly byla poté odečtena od nulové osy, čímž vznikla korigovaná nulová osa.

$$F = \rho g V$$

Kde: hustota pájky SAC305 $\rho = 7020 \text{ kgm}^{-3}$
 gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$
 objem ponořeného vzorku $V = a \cdot b \cdot c = 5 \cdot 3 \cdot 1 = 15 \text{ mm}^3$

$$F = \rho g V = 7020 \cdot 9,81 \cdot 15 \cdot 10^{-9} = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Dále se z grafu odečetla maximální smáčecí síla F_{\max} , ze které se poté vypočítala korigovaná maximální síla F_2 v závislosti ke korigované nule. Z této hodnoty se vypočítala hodnota 2/3, označovaná $F_{2/3}$, a z grafu se odečetl čas, při kterém je této síly dosaženo, tento čas je brán od počátku ponoření vzorku do pájky. Nakonec se vypočítal poměr $F_2/t_{2/3}$, podle kterého se vyhodnocuje smáčivost měřeného vzorku.

Tab 7.3 Naměřené a vypočtené hodnoty pro stárnuté vzorky povrchové úpravy ENIG

	ENIG						
	Nestárnuté	1h	2h	1x Pb	2x Pb	1x Pb free	2x Pb free
F_{vz} [mN]	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
F_{\max} [mN]	1,50	1,65	1,20	1,45	1,35	0,97	0,92
F_2 [mN]	2,53	2,68	2,23	2,48	2,38	2,00	1,95
$F_{2/3}$ [mN]	1,68	1,78	1,49	1,65	1,58	1,33	1,30
$t_{2/3}$ [s]	3,16	4,57	5,11	5,34	4,86	5,18	5,42
$F_2/t_{2/3}$ [mN/s]	0,80	0,59	0,44	0,46	0,49	0,39	0,36

Tab 7.4 Naměřené a vypočtené hodnoty pro stárnuté vzorky povrchové úpravy imerzní cín

Imerzní cín							
	Nestárnuté	1h	2h	1x Pb	2x Pb	1x Pb free	2x Pb free
F_{vz} [mN]	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
F_{max} [mN]	1,76	1,80	1,47	1,28	1,06	0,94	-0,09
F_2 [mN]	2,79	2,83	2,50	2,31	2,09	1,97	0,94
$F_{2/3}$ [mN]	1,86	1,88	1,66	1,54	1,39	1,32	0,63
$t_{2/3}$ [s]	2,73	3,86	3,79	3,21	2,95	2,85	3,45
$F_2/t_{2/3}$ [mN/s]	1,02	0,73	0,66	0,72	0,71	0,69	0,27

Tab 7.5 Naměřené a vypočtené hodnoty pro stárnuté vzorky povrchové úpravy HAL

Bezolovnatý HAL							
	Nestárnuté	1h	2h	1x Pb	2x Pb	1x Pb free	2x Pb free
F_{vz} [mN]	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
F_{max} [mN]	1,89	1,69	1,78	1,58	1,65	1,25	1,01
F_2 [mN]	2,92	2,72	2,81	2,61	2,68	2,28	2,04
$F_{2/3}$ [mN]	1,95	1,81	1,87	1,74	1,78	1,52	1,36
$t_{2/3}$ [s]	3,32	3,39	3,56	3,51	3,41	3,25	3,39
$F_2/t_{2/3}$ [mN/s]	0,88	0,80	0,79	0,74	0,78	0,70	0,60

Tab 7.6 Naměřené a vypočtené hodnoty porovnání typů ENIG

ENIG	1. ENIG	2. ENIG
F_{vz} [mN]	1,03	1,03
F_{max} [mN]	1,10	1,47
F_2 [mN]	2,13	2,50
$F_{2/3}$ [mN]	1,42	1,67
$t_{2/3}$ [s]	3,69	2,77
$F_2/t_{2/3}$ [mN/s]	0,68	0,77

Tab 7.7 Naměřené a vypočtené hodnoty stripovaných vzorků imerzního cínu

Imerzní cín				
	Nestripované	Stripované nestárnuté	Stripované Pb free reflow 1x	Stripované Pb free reflow 2x
F_{vz} [mN]	1,03	1,03	1,03	1,03
F_{max} [mN]	1,76	-2,60	-2,81	-3,59
F_2 [mN]	2,79	-1,57	-1,78	-2,56
$F_{2/3}$ [mN]	1,86	-2,10	-2,37	-3,41
$t_{2/3}$ [s]	2,73	3,11	3,44	2,08
$F_2/t_{2/3}$ [mN/s]	1,02	-0,51	-0,52	-1,23

Tab 7.8 Naměřené a vypočtené hodnoty stripovaného ENIGu po různé době stripování

ENIG						
Čas v lázni	0 s	5 s	10 s	15 s	20 s	25 s
F_{vz} [mN]	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
F_{max} [mN]	1,42	0,29	-2,84	-3,36	-2,71	-3,94
F_2 [mN]	2,45	1,32	-1,81	-2,33	-1,68	-2,91
$F_{2/3}$ [mN]	1,63	0,88	-2,41	-3,10	-2,24	-3,88
$t_{2/3}$ [s]	3,86	4,25	4,00	3,24	3,67	2,37
$F_2/t_{2/3}$ [mN/s]	0,64	0,31	-0,45	-0,72	-0,46	-1,23

Tab 7.9 Naměřené a vypočtené hodnoty stripovaného ENIGu po přetavovacích procesech

ENIG				
	Staré	Nové	Reflow 1x	Reflow 2x
F_{vz} [mN]	1,03	1,03	1,03	1,03
F_{max} [mN]	-2,39	-1,00	-1,06	1,30
F_2 [mN]	-1,36	0,03	-0,03	2,33
$F_{2/3}$ [mN]	-1,81	0,02	-0,04	1,55
$t_{2/3}$ [s]	4,07	6,43	7,54	3,65
$F_2/t_{2/3}$ [mN/s]	-0,33	0,00	0,00	0,64

Příklad výpočtů pro tabulku 7. 1 první sloupec:

$$F_{vz} = \rho g V = 7020 \cdot 9,81 \cdot 15 \cdot 10^{-9} = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ N} = 1,03 \text{ mN}$$

$$F_{max} = 1,50 \text{ mN (Odečteno z grafu)}$$

$$F_2 = F_{max} + F_{vz} = 1,50 + 1,03 = 2,53 \text{ mN}$$

$$F_{2/3} = \frac{2}{3} \cdot F_2 = \frac{2}{3} \cdot 2,53 = 1,68 \text{ mN}$$

$$t_{2/3} = 3,16 \text{ s (Odečteno z grafu)}$$

$$F_2/t_{2/3} = \frac{1,68}{3,16} = 0,53 \text{ mN/s}$$

Kde F_{vz} je vztlaková síla působící na ponořenou část, F_{max} je maximální smáčecí síla, F_2 je maximální smáčecí síla od korigované nuly, $F_{2/3}$ představuje hodnotu $2/3 F_2$, $t_{2/3}$ je čas, kdy je této síly dosaženo.

Tab 7.10 Naměřené a vypočtené hodnoty pro úbytek hmotnosti při stripování cínu

Imerzní cín							
t [s]	m ₁ [mg]	m ₂ [mg]	m ₃ [mg]	m ₄ [mg]	m ₅ [mg]	m ₆ [mg]	Průměr [mg]
0	207,40	207,00	207,30	207,00	207,50	207,30	207,25
10	206,00	205,80	206,20	206,30	207,00	206,30	206,27
20	205,90	205,60	206,00	206,30	206,60	206,20	206,10
40	205,80	205,40	205,90	206,20	206,40	206,20	205,98
60	205,80	205,30	205,90	206,20	206,30	206,10	205,93
120	205,50	205,20	205,60	206,00	206,30	205,90	205,75
180	205,30	205,20	205,30	205,90	206,30	205,70	205,62
Úbytek hmotnosti [mg]	2,10	1,80	2,00	1,10	1,20	1,60	1,63

Výpočet tloušťky odstripované vrstvy cínu pomocí rovnic 7. 1 a 7. 2:

Hmotnost odstripovaného cínu $m = 1,63 \text{ mg}$

Hustota cínu $\rho = 7298 \text{ kg/m}^3$

Povrch cínové vrstvy $S = 5 \cdot 20 \cdot 2 = 200 \text{ mm}^2$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{1,63 \cdot 10^{-6}}{7298} = 2,19 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3$$

$$tl = \frac{V}{S} = \frac{2,19 \cdot 10^{-10}}{200 \cdot 10^{-6}} = 1,1 \cdot 10^{-6} = 1,1 \text{ } \mu\text{m}$$

Kde V je objem odstripovaného cínu a tl je tloušťka odstripované vrstvy cínu.

Tab 7.11 Tloušťka vrstvy cínu měřená firmou Gatema

Imerzní cín	X-ray
Tloušťka [μm]	1,9

Tab 7.12 Naměřené a vypočtené hodnoty pro úbytek hmotnosti při stripování zlata

ENIG				
t [s]	m ₁ [mg]	m ₂ [mg]	m ₃ [mg]	Průměr [mg]
0	213,80	213,50	213,70	213,67
5	213,60	213,40	213,60	213,53
10	213,60	213,30	213,50	213,47
15	213,40	213,30	213,60	213,43
20	213,50	213,30	213,40	213,40
25	213,30	213,40	213,50	213,40

Výpočet tloušťky odstripované vrstvy zlata pomocí rovnic 7. 1 a 7. 2:

Hmotnost odstripovaného zlata $m = 0,27 \text{ mg}$

Hustota zlata $\rho = 19320 \text{ kg/m}^3$

Povrch zlaté vrstvy $S = 5 \cdot 20 \cdot 2 = 200 \text{ mm}^2$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{0,27 \cdot 10^{-6}}{19320} = 1,398 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3$$

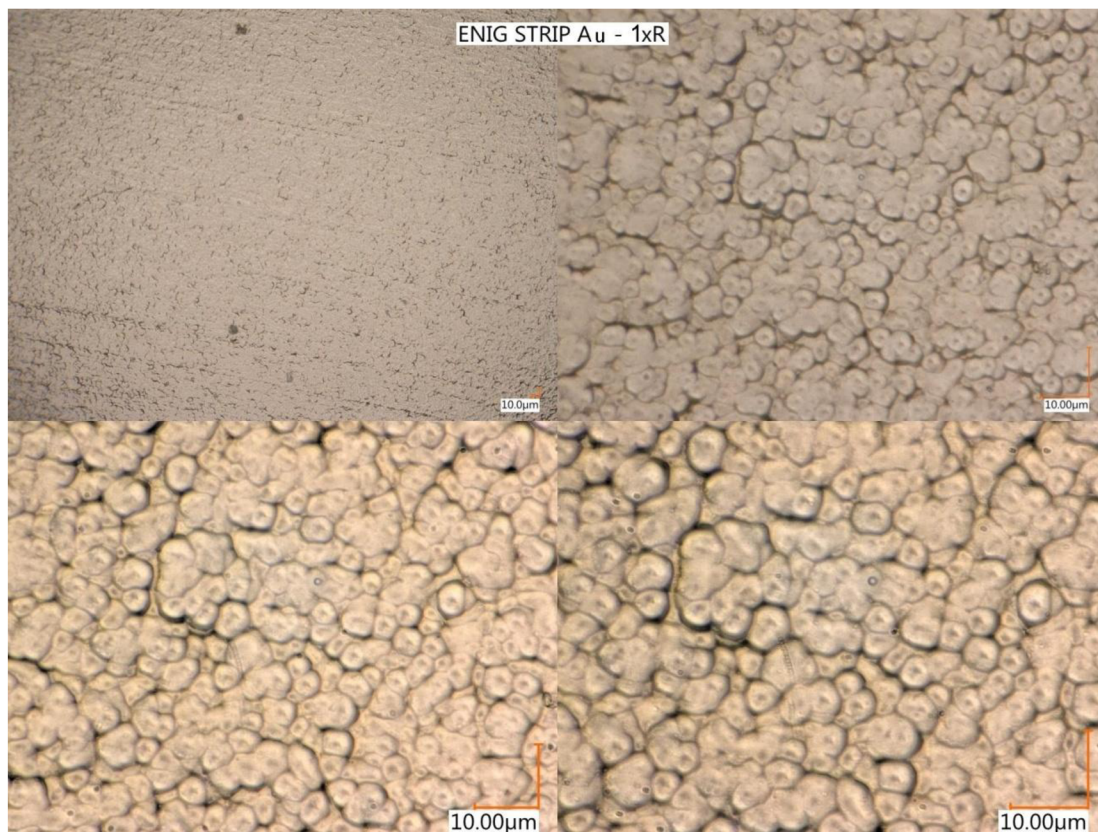
$$tl = \frac{V}{S} = \frac{1,398 \cdot 10^{-11}}{200 \cdot 10^{-6}} = 6,99 \cdot 10^{-8} = 0,0699 \text{ } \mu\text{m}$$

Kde V je objem odstripovaného zlata a tl je tloušťka odstripované vrstvy zlata.

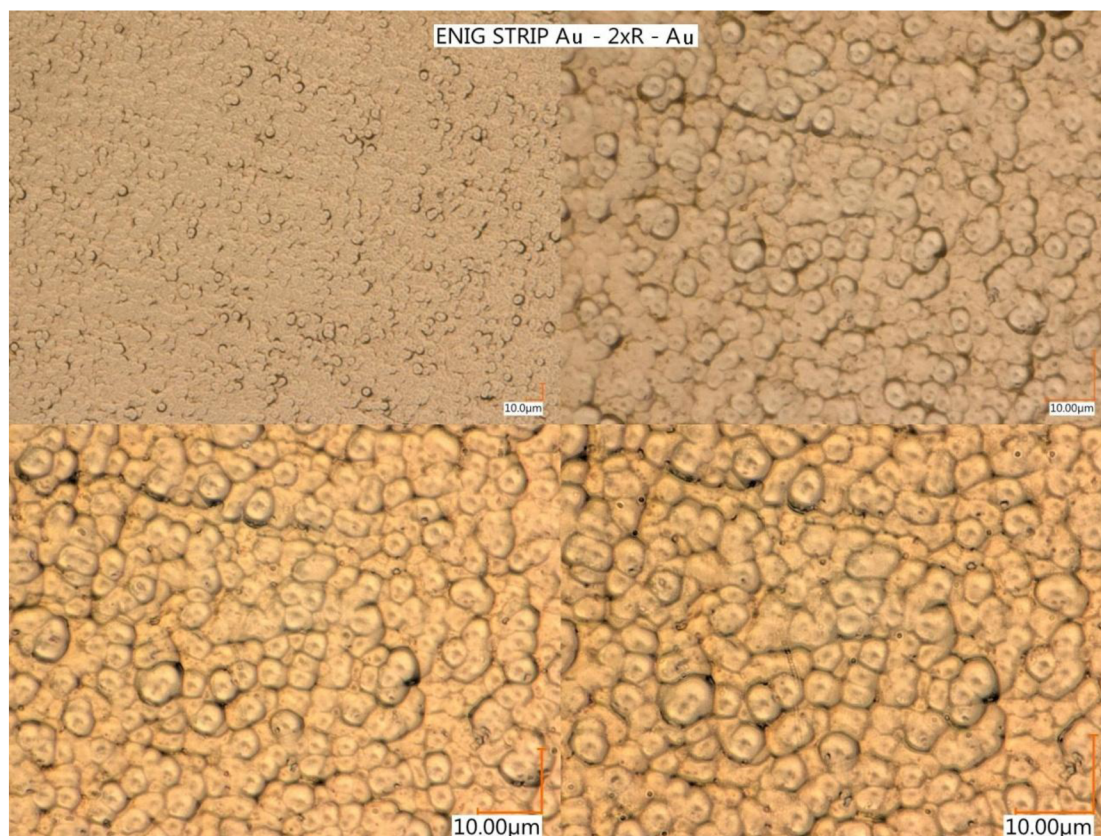
Tab 7.13 Tloušťka vrstev zlata a niklu měřená firmou Gatema

ENIG	X-ray	
	Ni	Au
Tloušťka [μm]	5,16	0,04

Na obrázcích 8.1 a 8.2 je povrch vzorků po odstripování vrstvy zlata a vzorků, u kterých k odstripování zlata nedošlo. Tento povrch je zobrazen pomocí digitálního mikroskopu s maximálním zvětšením 5000x.



Obr 7.19 Povrch ENIG po odstripování vrstvy zlata (reflow 1x)



Obr 7.20 Povrch ENIGu u kterého se nepodařilo odstripovat vrstvu zlata (reflow 2x)

Výsledky prvkové analýzy:

Tab 7.14 Prvková analýza nestárnutých vzorků

Nestárnuté					
Prvek	Protonové číslo	Series	Norm. C	Atom. C	Error (3 Sigma)
			[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Ni	28	K series	74,78	57,47	3,48
P	15	K series	6,44	9,38	0,56
Au	79	L series	10,6	2,43	0,58
C	6	K series	8,18	30,72	2,83
		Total	100	100	

Tab 7.15 Prvková analýza vzorků po průchodu přetavovací peci

Reflow 1x					
Prvek	Protonové číslo	Series	Norm. C	Atom. C	Error (3 Sigma)
			[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Ni	28	K series	75,31	57,36	3,46
P	15	K series	6,9	9,97	0,59
Au	79	L series	9,6	2,18	0,53
C	6	K series	8,19	30,49	2,81
		Total	100	100	

Tab 7.16 Prvková analýza vzorků po 2 průchodech přetavovací peci

Reflow 2x					
Prvek	Protonové číslo	Series	Norm. C	Atom. C	Error (3 Sigma)
			[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Ni	28	K series	78,44	62,82	3,93
P	15	K series	6,14	9,32	0,57
Au	79	L series	8,84	2,11	0,54
C	6	K series	6,58	6,58	2,56
		Total	100	100	

Tab 7.17 Prvková analýza odstřípovaných vzorků

Odstřípované 5 s					
Prvek	Protonové číslo	Series	Norm. C	Atom. C	Error (3 Sigma)
			[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Ni	28	K series	81,18	56,1	3,94
P	15	K series	9,51	12,45	0,82
C	6	K series	9,31	31,45	3,38
		Total	100	100	

8 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Vyhodnocován je vliv izotermálního stárnutí a průchodů přetavovací peci na smáčecí charakteristiky různých povrchových úprav a dále vliv odstripování vrstvy cínu u povrchové úpravy imerzním cínem a odstripování vrstvy zlata u technologie ENIG. Naměřené smáčecí charakteristiky jsou vyhodnocovány pomocí poměru $F_2/t_{2/3}$ [mN/s], mezi maximální smáčecí silou branou od korigované nulové osy a časem, kdy je dosaženo 2/3 této hodnoty. Tato hodnota by měla být co největší, aby bylo dosaženo co nejlepšího smáčení. Pokud je tato hodnota záporná, znamená to, že ke smáčení nedošlo. Tyto vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulkách v předchozí kapitole, kde jsou také graficky zobrazeny všechny smáčecí charakteristiky. Kromě smáčecích charakteristik je vyhodnocen také úbytek hmotnosti při stripování cínu a zlata.

➤ Nestárnuté vzorky

Pro nestárnuté vzorky povrchových úprav bylo dosaženo nejlepších hodnot pro povrchovou úpravu imerzním cínem a to 1,02 mN/s. Za touto technologií následovala povrchová úprava bezolovnatý HAL, která dosahovala jen lehce horších hodnot, konkrétně 0,88 mN/s, přičemž zde bylo dosaženo vyšší maximální smáčecí síly než u imerzního cínu, ale doba $t_{2/3}$ zde byla delší. Nejhorší smáčivosti bylo dosaženo u povrchové úpravy ENIG, kde bylo dosaženo hodnoty 0,8 mN/s, tedy přibližně o 22 % horšího smáčení než u imerzního cínu a o 9 % než u technologie bezolovnatý HAL.

➤ Vzorky po izotermálním stárnutí

Vzorky byly dále vystaveny izotermálnímu stárnutí za teploty 155 °C po dobu 1 h a 2 h. Z tohoto testu vyšla nejlépe povrchová úprava HAL, u které poklesla hodnota poměru $F_2/t_{2/3}$ pouze o necelých 11 %. U povrchové úpravy imerzním cínem byl tento pokles 36 %, a u úpravy ENIG se jednalo o zhoršení o 45 %. U povrchové úpravy ENIG ovšem především se prodloužila doba, než dojde ke smáčení téměř o 2 s. U technologie HAL, byl pokles, kolem 0,2 s. U povrchové úpravy imerzním cínem došlo k prodloužení doby $t_{2/3}$ přibližně o 1 s. V celkovém důsledku, ovšem vzorky žádné povrchové úpravy nebyly ovlivněny natolik, aby byla smáčivost příliš zhoršena, nebo aby ke smáčení vůbec nedošlo.

➤ Vzorky po průchodu přetavovací peci s profilem pro olovnaté pájení

Následující test vyhodnocoval vliv průchodu přetavovací peci s nastaveným profilem pro olovnaté pájení na smáčivost vzorků. Při nastavení profilu pro olovnaté pájení docházelo k menší zátěži vzorků, jelikož zde byla nastavena nižší maximální teplota zářičů v peci, a to 245 °C, zatímco u profilu pro bezolovnaté pájení byla maximální teplota zářičů v peci nastavena na 260 °C. Testování probíhalo po 1 a 2 průchodech. Zde už došlo k většímu zhoršení smáčivosti u některých povrchových úprav, ke smáčení ovšem došlo ve všech

případech. Nejlépe z tohoto testu vyšly vzorky s povrchovou úpravou HAL, u kterých došlo ke zhoršení smáčivosti asi o 10 % po dvou průchodech přetavovací pecí. U imerzního cínu došlo ke zhoršení po druhém průchodu již o 30 %. Nejhůře vyšla z tohoto testu úprava ENIG, u které došlo k poklesu o přibližně 39 %. U technologie ENIG došlo opět především k prodloužení doby $t_{2/3}$, zatímco maximální smáčecí síla se zmenšila pouze o 10 %, tak čas $t_{2/3}$ se zvětšil o 53 %. U ostatních povrchových úprav došlo naopak spíše ke snížení maximální smáčecí síly, u imerzního cínu o 40 % a u HALu o 17 %. Toto snížení je způsobeno nárůstem intermetalické vrstvy na rozhraní měď-cín. Dále také oxidací povrchu vzorku, což je vzhledem k tloušťce vrstvy cínu problém především u imerzního cínu.

➤ Vzorky po průchodu přetavovací pecí s profilem pro bezolovnaté pájení

V případě tohoto testu došlo k většímu zatížení vzorků než v případě průchodu přetavovací pecí s nastaveným profilem pro olovnaté pájení, jelikož zde byla nastavena vyšší maximální teplota. Vzhledem k větší zátěži došlo také k výraznějšímu zhoršení smáčecích charakteristik, což se nejvíce projevilo u povrchové úpravy imerzním cínem. U této úpravy došlo po dvou průchodech ke zhoršení o 74 %, a hodnota $F_2/t_{2/3}$ byla tedy pouze 0,27 mN/s, což už se blíží mezi smáčivosti. Lépe tímto testem prošly vzorky s povrchovou úpravou ENIG, kde došlo k poklesu o 55 %, opět to bylo způsobeno především prodloužením doby $t_{2/3}$. Nejlépe dopadla technologie bezolovnatý HAL, u které došlo ke zhoršení poměru $F_2/t_{2/3}$ o 32 %.

➤ Porovnání typů ENIG

Další test se věnoval porovnání smáčivosti dvou druhů povrchové úpravy ENIG. Rozdíl mezi těmito druhy byl v množství příměsí fosforu ve vrstvě niklu, které bylo větší u prvního druhu. Poměr $F_2/t_{2/3}$ byl pro oba druhy téměř totožný, přičemž lehce lepší výsledek vykazoval 2. ENIG s hodnotou 0,77 mN/s, zatímco pro 1. ENIG vyšla hodnota 0,68 mN/s, rozdíl byl tedy minimální. Větší maximální smáčecí sílu ovšem vykazoval 2. ENIG, která byla o 33 % větší než u prvního ENIGu. Čas než ke smáčení došlo, byl ale také delší než u prvního druhu.

➤ Vzorky imerzního cínu po odstripování vrstvy cínu a úbytek hmotnosti

Tento test se zabýval změnou smáčivosti po odstripování vrstvy cínu až na vrstvu intermetalických sloučenin u vzorků s povrchovou úpravou imerzním cínem. Vzorky byly ponořeny do stripovacího roztoku po dobu 3 minut při teplotě 23 °C. Již po odstripování vrstvy cínu došlo ke znatelnému zhoršení smáčivosti. Maximální smáčecí síla, braná od korigované nuly, dosáhla pouze hodnoty -1,57 mN, vztlaková síla tedy převyšovala sílu smáčecí a ke smáčení tedy nedošlo.

Dále byly stripovány a následně změřeny vzorky, které prošly přetavovací pecí s nastaveným profilem pro bezolovnaté pájení, a to po jednom a dvou průchodech. Zde došlo k většímu zhoršení až po druhém průchodu, po prvním byla hodnota poměru $F_{2/3}/t_{2/3}$ přibližně stejná, tedy asi -0,52 mN/s. Po druhém průchodu přetavovací pecí již došlo ke zdatelnému zhoršení na hodnotu -1,23 mN/s. Ani v jednom případě tedy po odstripování vrstvy cínu nedošlo ke smáčení povrchu.

Během stripování cínu byl měřen úbytek hmotnosti vzorků pomocí analytických vah. Z naměřených hodnot byla vypočítána tloušťka odstripované vrstvy cínu. K největšímu úbytku hmotnosti došlo již během prvních 10 sekund, jednalo se o úbytek kolem 1 mg. Dále se již rychlost úbytku hmotnosti snižovala pomaleji. V první minutě stripování byl celkový úbytek hmotnosti přibližně 1,3 mg. Celkový úbytek hmotnosti po 3 minutách ve stripovacím roztoku se pohyboval v rozmezí 1,1 –2,1 mg. Tato hodnota se liší v závislosti na tloušťce nanesené vrstvy cínu a na tloušťce intermetalické vrstvy. Průměr tedy činil zhruba 1,6 mg, 61 % z celkového úbytku tedy bylo odstripováno již během prvních 10 sekund. Původní tloušťka změřená firmou Gatema byla 1,9 μm . Tloušťka námi odstripované vrstvy cínu byla vypočtena na 1,1 μm . Ve zbylé vrstvě zůstal cín zabudován v intermetalické sloučenině, přičemž by tloušťka této vrstvy mohla být přibližně 0,8 μm (dle měření z firmy Gatema). Mez, při které by ještě mělo dojít ke smáčení, je udávána na 1,2 μm . To by korespondovalo i s dosaženými výsledky smáčecích charakteristik, jak je uvedeno v předcházející části.

➤ Vzorky ENIGu po odstripování zlata

Pro stripování zlata povrchové úpravy ENIG byly nejprve použity vzorky přibližně 6 měsíců staré, které byly na různě dlouhou dobu ponořeny do stripovacího roztoku. Konkrétně na 5 s, 10 s, 15 s, 20 s a 25 s. Následně byly vloženy na 15 minut, při teplotě 60 °C do sušičky plošných spojů, aby nedošlo k ovlivnění měření vlivem nasáknutí. Vzorkům byly poté změřeny smáčecí charakteristiky, které se porovnaly s charakteristikami nestripovaných vzorků. U stripovaných vzorků došlo ke smáčení pouze u vzorků, které byly ponořeny do stripovacího roztoku na 5 s, ale i zde došlo k prudkému zhoršení smáčecích charakteristik. U dalších vzorků již ke smáčení vůbec nedošlo a charakteristiky se zhoršovaly úměrně s dobou ve stripovacím roztoku. Zhoršení smáčecích charakteristik je způsobeno rychlou oxidací vrstvy niklu, jakmile je odstripována ochranná vrstva zlata.

Ještě než byly odstripovaným vzorkům změřeny smáčecí charakteristiky, byl u nich měřen úbytek hmotnosti v závislosti na čase v lázni. Následně byla vypočítána tloušťka odstripované vrstvy zlata. Průměrný úbytek hmotnosti po 25 sekundách ve stripovacím roztoku byl 0,27 mg. Tloušťka odstripované vrstvy zlata tedy byla vypočítána 0,07 μm . Přičemž tloušťka vrstvy zlata změřená firmou Gatema byla 0,04 μm , což znamená, že nedošlo pouze k odstripování vrstvy zlata, ale došlo i k úbytku na vrstvě niklu.

Dále byly měřeny nové vzorky povrchové úpravy ENIG a to nestárnuté a po 1 a 2 průchodech přetavovací pecí s profilem nastaveným pro bezolovnaté pájení a poté stripované. Tyto vzorky byly ponořeny do stripovacího roztoku na 20 s. Následně byly opět

vloženy do sušičky plošných spojů, a poté jim byly změřeny smáčecí charakteristiky. Nestárnuté nové vzorky oproti vzorkům starým 6 měsíců vykazovaly lepší charakteristiky. Zatímco u starých vzorků byla hodnota $F_2/t_{2/3}$ -0,33 mN/s, tak u nových se byla tato hodnota přesně na mezi smáčivosti tedy 0 mN/s. U vzorků, které byly vystaveny průchodu přetavovací peci, nedošlo v některých případech k odstripování vrstvy zlata. U vzorků, které prošly přetavovací pecí dvakrát, již nedošlo k odstripování zlata u žádného ze vzorků, což způsobilo, že vzorky měly téměř stejné smáčecí charakteristiky jako vzorky neodstripované a nestárnuté i když by zde mělo dojít ke zhoršení.

Aby byl zjištěn důvod, proč u některých vzorků nedošlo k odstripování zlata, byla provedena prvková analýza. Pomocí této analýzy bylo zjištěno, že po průchodu přetavovací pecí došlo u vzorků ke zvýšení podílu niklu, především u vzorků po dvou průchodech. Znamená to, že zde pravděpodobně došlo k difúzi niklu do vrstvy zlata a pravděpodobně i k rekrystalizaci, což způsobilo, že tato vrstva nemohla být odstripována. Dále bylo prvkovou analýzou také zjištěno, že k úplnému odstripování zlata dojde již po 5 vteřinách ve stripovacím roztoku, pokud vzorky nebyly výrazněji tepelně zatíženy.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá měřením smáčivosti a vlivem izotermálního stárnutí a průchodů přetavovací peci na smáčecí charakteristiky vzorků s různými povrchovými úpravami. Měřeny byly vzorky s povrchovými úpravami bezolovnatý HAL, ENIG a imerzní cín. Smáčecí charakteristiky byly měřeny pomocí metody smáčecích vah. U vzorků s povrchovou úpravou imerzním cínem se smáčivost navíc měřila po odstripování vrstvy cínu na vrstvu intermetalických sloučenin a po následném vystavení izotermálnímu stárnutí. Naměřené hodnoty slouží především pro porovnání mezi různými povrchovými úpravami a pro vyhodnocení různých vlivů na smáčivost.

V teoretické části se práce věnuje problematice povrchových úprav a výhodám jednotlivých technologií. Dále se zde práce zabývá smáčivostí, jejím měřením pomocí metody smáčecích vah a vlivem stárnutí materiálu na smáčivost.

V první části praktického měření byl zjišťován vliv izotermálního stárnutí a přetavovacích procesů. Nejprve byly změřeny vzorky po dodání, zde nejlepších výsledků dosáhly povrchové úpravy HAL a imerzní cín, které byly srovnatelné. Povrchová úprava ENIG vykazovala horší smáčecí charakteristiky, ale hodnoty nebyly nijak kritické. Po vystavení izotermálnímu stárnutí se smáčivost všech vzorků příliš nezhoršila, k většímu zhoršení došlo až po průchodech přetavovací peci. Měření probíhalo po jednom a dvou průchodech přetavovací peci, přičemž byl nastaven teplotní profil pro bezolovnaté nebo olovnaté pájení. Zde již došlo k podstatnějšímu zhoršení smáčecích charakteristik. Toto zhoršení je způsobeno nárůstem intermetalické vrstvy a vlivem oxidace, což se projevuje především u povrchové úpravy imerzním cínem. Dále se v tomto testu ukázalo, že největší stabilitu vykazují vzorky s povrchovou úpravou HAL, o něco horší výsledky vyšly pro technologii ENIG, přičemž ale zde došlo hlavně k prodloužení doby, než dojde ke smáčení, ale maximální smáčecí síla se příliš nezmenšila. Nejhuře z tohoto měření vyšly vzorky s povrchovou úpravou imerzním cínem. V aplikacích, které mohou být vystaveny tepelnému zatížení, je tedy i přes horší smáčecí charakteristiky po výrobě nejvhodnější technologie ENIG, popřípadě HAL, kvůli jejich teplotní stabilitě.

V další části byly měřeny vzorky dvou druhů povrchové úpravy ENIG, přičemž první se lišil větším obsahem fosforu ve vrstvě niklu. Rozdíl v celkové smáčivosti byl minimální, u druhého typu bylo dosaženo vyšší maximální smáčecí síly, ale zároveň se zvýšil čas, než došlo ke smáčení. Lehce lepších smáčecích charakteristik ovšem dosahoval druhý typ ENIGu s nižším obsahem fosforu.

Následující část praktické úlohy se věnovala stripování vrstvy cínu u vzorků s povrchovou úpravou imerzním cínem. Ze vzorků byla odstripována vrstva cínu, ale zůstala zde vrstva intermetalických sloučenin. Stripování probíhalo po dobu 3 minut za teploty 23 °C. Během stripování byla také měřena hmotnost vzorků, a poté vyhodnocen úbytek hmotnosti. K největšímu úbytku hmotnosti při stripování došlo již během prvních 10 sekund, následně se rychlost stripování snížila, jakmile se stripovací roztok dostal na intermetalickou vrstvu,

k úplnému zastavení ovšem nedošlo. Velikost odstripované vrstvy cínu byla vypočtena 1,1 μm . Zbylá vrstva tedy měla přibližně 0,8 μm , což už je pod mezí smáčivosti, která je udávána 1,2 μm . Po odstripování cínu byly změřeny smáčecí charakteristiky. Vzorky vykazovaly výrazně horší výsledky a velikost maximální smáčecí síly nebyla větší než síla vztlková, ke smáčení tedy nedošlo. Dále byly odstripovány vzorky, které nejprve byly vystaveny 1 a 2 průchodům přetavovací peci, s nastaveným teplotním profilem pro bezolovnaté pájení. U těchto vzorků došlo k dalšímu zhoršení smáčecích charakteristik, obzvláště po dvou průchodech bylo zhoršení velmi výrazné. Toto zhoršení je způsobeno nárůstem intermetalické vrstvy při průchodu přetavovací peci. Po odstripování cínu se měří smáčivost vrstvy intermetalické sloučeniny.

Poslední měření se zabývalo stripováním vrstvy zlata u povrchové úpravy ENIG. Zde byly měřeny nejprve vzorky po 5 s, 10 s, 15 s, 20 s a 25 s strávených ve stripovacím roztoku. Bylo zjištěno, že k odstripování zlata došlo již po 5 s (což bylo poté prokázáno při prvkové analýze), přičemž došlo k prudkému zhoršení smáčecích charakteristik a ke smáčení vůbec nedošlo, dále došlo k dalšímu zhoršení úměrně s časem stráveným ve stripovacím roztoku. Toto zhoršení je způsobeno především rychlou oxidací niklu po odstripování vrstvy zlata. U těchto vzorků byla také měřena hmotnost, z čehož byl zjištěn úbytek a byla vypočítána tloušťka odstripované vrstvy zlata. Tloušťka odstripované vrstvy zlata byla vypočítána 0,07 μm . Přičemž tloušťka vrstvy zlata změřená firmou Gatema byla 0,04 μm , což znamená, že nedošlo pouze k odstripování vrstvy zlata, ale došlo i k úbytku na vrstvě niklu. Dále byly měřeny vzorky, které byly nejprve vystaveny 1 a 2 průchodům přetavovací peci s nastaveným teplotním profilem pro bezolovnaté pájení. Zde u některých vzorků po prvním průchodu přetavovací peci nedošlo k odstripování vrstvy zlata pravděpodobně vlivem difúze niklu do zlata, což mělo za následek, že smáčecí charakteristiky vyšly shodně s charakteristikami nestripovaných vzorků. U vzorků po dvou průchodech již byla difúze tak výrazná, že k odstripování zlata již nedošlo u žádných vzorků.

Povrchové úpravy DPS, teplotní a environmentální vlivy na smáčivost povrchu jsou podstatné pro spolehlivost zejména bezolovnatého pájeného spoje. V těchto pracích by bylo velmi zajímavé pokračovat, zejména v simulaci vnějších podmínek nevhodného skladování.

LITERATURA

- [1] SZENDIUCH, I. *Pájení a bezolovnaté pájky* [online] [cit 5. listopadu 2015] Dostupné na www: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [2] LABAJ R. *Vliv smáčecích charakteristik na spolehlivost pájeného spoje* Bakalářská práce Brno: FEKT VUT v Brně, 2010.
- [3] Metoda smáčecích vah [online] [cit 5. listopadu 2015] Dostupné na www: <http://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/metoda-smacecich-vah/>
- [4] JURÁK, K., NEJEZCHLEBOVÁ, Z. *Zkoušení elektronických sestav*, [online] [cit 5. listopadu 2015] Dostupné na www: <http://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:19948-/nove-v-e-archivu-zkouseni-elektronickych-sestav-terminologie>
- [5] STARÝ, J., KAHLE, P. *Plošné spoje a povrchová montáž* Elektronické skriptum Brno: FEKT VUT v Brně, 2003
- [6] KESTER 979 [online] [cit 5. listopadu 2015] Dostupné z <http://www.amtech.cz/pdf/pajeci-materialy/979.pdf>
- [7] Rollback the Lead-Free Initiative [online] [cit 5. listopadu 2015] Dostupné z http://www.sigcon.com/Pubs/news/10_01.htm
- [8] STARÝ, J., ZATLOUKAL, M. *Montážní a propojovací technologie* Elektronické skriptum Brno: FEKT VUT v Brně, 2014
- [9] Pioneer™ Series [online] [cit 5. listopadu 2015] Dostupné z www: <http://dmx.ohaus.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=5208>
- [10] HARANT, P., STEINER, F., *Testování pájitelnosti metodou smáčecích vah* [online] [cit 5. listopadu 2015] Dostupné z www: <https://dspace.zcu.cz/bitstream/handle/11025/392/r0c1c8.pdf?sequence=1>
- [11] Povrchové úpravy Saturn Chemický cín Ormecon [online] [cit 5. listopadu 2015] Dostupné z www: <http://www.semach.cz/povrchy3.html>
- [12] Immersion Tin [online] [cit 5. listopadu 2015] Dostupné z www: <http://www.atotech.com/products/electronics/final-finishing/immersion-tin.html>
- [13] SZENDIUCH, I., HEJÁTKOVÁ, E., *Mikroelektronika a technologie součástek* Elektronické skriptum Brno: FEKT VUT v Brně, 2013
- [14] PCB Surface Finishes – Implication on the SMT Process Yield [online] [cit 5. listopadu 2015] Dostupné z www: http://www.smta.org/chapters/files/SMTA_India_03_PCB_Surface_Finishes_-_Implication_on_the_SMT_Process_Yield_%28Liya-Indium%29.pdf

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

HAL	Hot Air Leveling
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold
VOC	Volatile Organic Compounds
θ	Smáčecí úhel
γ	Povrchové napětí
p	Obvod vzorku
g	Gravitační zrychlení
ρ	Hustota
V	Objem ponořené části vzorku
S	Obsah plochy s povrchovou úpravou
m	Hmotnost
F_{vz}	Vztlaková síla
F_{max}	Maximální smáčecí síla
F_2	Součet maximální smáčecí síly a vztlakové síly
$F_{2/3}$	2/3 síly F_2
$t_{2/3}$	Čas, kdy je dosaženo síly $F_{2/3}$

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr 1.1 Cínové whiskery [7].....	11
Obr 2.1 Srovnání spoje s pájkou SAC305 a SnPb36Ag2 [5].....	12
Obr 4.1 Smáčení povrchu pájkou [2]	16
Obr 5.1 Intermetalické vrstvy při pájení [1].....	18
Obr 6.1 Schéma meniskografu [4]	19
Obr 6.2 Průběh měření metodou smáčecích vah [8]	20
Obr 6.3 Různé průběhy smáčení [3].....	21
Obr 6.4 Síla $F_{2/3}$ v čase $t_{2/3}$ [2]	21
Obr 7.1 Vzorky povrchových úprav (imerzní cín, ENIG, bezolovnatý HAL).....	23
Obr 7.2 Použitý teplotní profil pro olovnaté pájení	25
Obr 7.3 Použitý teplotní profil pro bezolovnaté pájení	26
Obr 7.4 Pracoviště pro stripování cínu.....	26
Obr 7.5 Měřící pracoviště pro měření smáčivosti	28
Obr 7.6 Smáčecí charakteristiky nestárnutých povrchových úprav	28
Obr 7.7 Smáčecí charakteristiky ENIGu po izotermálním stárnutí	29
Obr 7.8 Smáčecí charakteristiky ENIGu po průchodech přetavovací peci.....	29
Obr 7.9 Smáčecí charakteristiky bezolovnatého HALu po izotermálním stárnutí	30
Obr 7.10 Smáčecí charakteristiky bezolovnatého HALu po průchodech přetavovací peci	30
Obr 7.11 Smáčecí charakteristiky imerzního cínu po izotermálním stárnutí	31
Obr 7.12 Smáčecí charakteristiky imerzního cínu po průchodech přetavovací peci	31
Obr 7.13 Smáčecí charakteristika srovnání dvou druhů povrchové úpravy ENIG	32
Obr 7.14 Smáčecí charakteristika stripovaných vzorků imerzního cínu.....	32
Obr 7.15 Smáčecí charakteristiky stripovaných vzorků ENIGu v závislosti na čase v lázni ..	33
Obr 7.16 Smáčecí charakteristiky stripovaného ENIGu po průchodech přetavovací peci	33
Obr 7.17 Imerzní cín - závislost úbytku hmotnosti na čase ve stripovacím roztoku	34
Obr 7.18 ENIG - závislost úbytku hmotnosti na čase ve stripovacím roztoku	34
Obr 7.19 Povrch ENIG po odstripování vrstvy zlata (reflow 1x)	39
Obr 7.20 Povrch ENIGu u kterého se nepodařilo odstripovat vrstvu zlata (reflow 2x).....	40

SEZNAM TABULEK

Tab 7.1 Přehled měření pro jednotlivé povrchové úpravy	24
Tab 7.2 Nastavení teplot zářičů pro průchod přetavovací pecí	25
Tab 7.3 Naměřené a vypočtené hodnoty pro stárnuté vzorky povrchové úpravy ENIG	35
Tab 7.4 Naměřené a vypočtené hodnoty pro stárnuté vzorky povrchové úpravy imerzní cín. 36	
Tab 7.5 Naměřené a vypočtené hodnoty pro stárnuté vzorky povrchové úpravy HAL.....	36
Tab 7.6 Naměřené a vypočtené hodnoty porovnání typů ENIG	36
Tab 7.7 Naměřené a vypočtené hodnoty stripovaných vzorků imerzního cínu	36
Tab 7.8 Naměřené a vypočtené hodnoty stripovaného ENIGu po různé době stripování	37
Tab 7.9 Naměřené a vypočtené hodnoty stripovaného ENIGu po přetavovacích procesech ..	37
Tab 7.10 Naměřené a vypočtené hodnoty pro úbytek hmotnosti při stripování cínu	38
Tab 7.11 Tloušťka vrstvy cínu měřená firmou Gatema	38
Tab 7.12 Naměřené a vypočtené hodnoty pro úbytek hmotnosti při stripování zlata.....	38
Tab 7.13 Tloušťka vrstev zlata a niklu měřená firmou Gatema.....	39
Tab 7.14 Prvková analýza nestárnutých vzorků.....	40
Tab 7.15 Prvková analýza vzorků po průchodu přetavovací pecí.....	40
Tab 7.16 Prvková analýza vzorků po 2 průchodech přetavovací pecí	41
Tab 7.17 Prvková analýza odstripovaných vzorků	41